

แบบแผนการประเมินผลการทดลองของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
ในหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วน

EXPERIMENTAL EVALUATION SCHEME OF ELECTROMAGNETIC WAVE
PROPAGATION IN TRANSFORMER FOR PARTIAL DISCHARGE DETECTION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2566

KMITL-2023-EN-D-018-063

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EXPERIMENTAL EVALUATION SCHEME OF ELECTROMAGNETIC WAVE
PROPAGATION IN TRANSFORMER FOR PARTIAL DISCHARGE DETECTION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2023-EN-D-018-063



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

แบบแผนการประเมินผลการทดลองของการ
แพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้า
สำหรับการตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วน

นักศึกษา

นายธนดล เตียงทอง

รหัสประจำตัว

60601188

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2566

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

ผศ.ดร.สถาพร พรหมวงศ์

บทคัดย่อ

ความล้มเหลวของหม้อแปลงมีนัยยะสำคัญต่อเศรษฐกิจและสังคม โดยการดิสซาร์จบางส่วน เป็นปัจจัยสำคัญในการล้มเหลวของหม้อแปลงไฟฟ้า วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการประยุกต์ใช้การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยพิจารณาเฉพาะฟังก์ชันถ่ายโอนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงบนพื้นฐานสูตรการส่งผ่านของฟรีส และใช้วงจรกรองแบบแมตซ์เป็นตัวรับสัญญาณเพื่อปรับคุณภาพสัญญาณให้เหมาะสม ใช้เครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่ายแบบเวกเตอร์เพื่อวัดและบันทึกผล นำเสนอสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปที่ทำงานที่ความถี่ 2.4 จิกะเฮิร์ตซ์ทำหน้าที่เป็นทั้งสายอากาศรับและส่ง ทำให้สามารถศึกษาคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ โดยประเมินผลจาก ขนาดและเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอน ภาพตัดขวางการประวิงกำลังงาน และการสูญเสียเชิงวิถี ผลการทดลองวิจัยแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่างๆ และเปรียบเทียบระหว่างกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง ผลการทดลองวิจัยสามารถสรุปได้ว่าการมีสิ่งกีดขวางภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะส่งผลต่อฟังก์ชันถ่ายโอนการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างมีนัยยะสำคัญ เนื่องจากได้รับผลกระทบจากการสะท้อนภายในหม้อแปลงไฟฟ้า วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอแบบแผนการประเมินผลวิจัยที่มีประโยชน์อย่างยิ่งทำให้ทราบคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถนำไปพัฒนาเซนเซอร์หรือสายอากาศที่เหมาะสม การวางตำแหน่งของเซนเซอร์และวิธีการประเมินผลวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วนได้ โดยการพิจารณาจากภาพตัดขวางการประวิงกำลังงาน และมีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการพัฒนาการตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วนด้วยวิธีแม่เหล็กไฟฟ้า และสามารถใช้เป็นทฤษฎีอ้างอิงในการศึกษาวิจัยในอนาคตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-----------------------|---|
| Thesis Title | Experimental Evaluation Scheme of Electromagnetic Wave Propagation in Transformer for Partial Discharge Detection |
| Student | Mr. Thanadol Tiengthong |
| Student ID. | 60601188 |
| Degree | Doctor of Engineering |
| Program | Electrical Engineering |
| Year | 2023 |
| Thesis Advisor | Asst. Prof. Dr. Sathaporn Promwong |

ABSTRACT

The failure of transformers is of significant importance to the economy and society, and partial discharge (PD) is a crucial factor in transformer failure. This thesis investigates the application of electromagnetic wave propagation to detect partial discharges in transformers. Specifically, the study focuses on the transfer function of electromagnetic waves within the transformer based on the Friis' transmission formula. A matched filter is utilized as a receiver to adjust the signal quality appropriately. The research employs vector network analyzers to measure and record the results. A microstrip patch antenna operating at 2.4 GHz serves as both a transmitting and receiving antenna, enabling the study of the characteristics of electromagnetic wave propagation in the transformer. The assessment includes the evaluation of transfer function magnitude and phase, power delay profile, and path loss. The experimental results reveal the features of electromagnetic wave propagation within the transformer at different positions and compare the cases of unobstructed and obstructed environments. The research findings demonstrate the significant impact of internal obstructions on the transfer function of electromagnetic wave propagation, as it is affected by internal reflections within the transformer. This thesis presents a highly beneficial experimental evaluation scheme, providing insights into the characteristics of electromagnetic wave propagation within transformers. This knowledge can be utilized to further develop suitable sensors or antennas. The positioning of sensors and the methodology for evaluating the performance in detecting partial discharges can be employed, considering the power delay profile. Moreover, the research serves as a valuable reference for future studies in this field.

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างยิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สถาพร พรหมวงศ์ ห้องปฏิบัติการวิจัยวิทยุอิมพัลส์แถบกว้างยิ่ง ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ประสบการณ์ และชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาตลอดระยะเวลาที่ข้าพเจ้าได้ศึกษาของหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า เพื่อฝึกฝนให้ข้าพเจ้ามีความสามารถในการทำงานวิจัย และมีความรู้ความสามารถ เหมาะสมกับปริญญาที่ได้รับ ตลอดจนแนะนำแนวทางใช้ชีวิตในด้านต่าง ๆ ด้วยความอดทนและความดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดี รวมถึงช่วยตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องต้นฉบับของวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จสมบูรณ์ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงยิ่งมา ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ โดยมี รศ.ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี รศ.ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ รศ.ดร.ชรินทร์ บุญลักษณะนามสุรณ รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช และ ศ.ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำและทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร.ศักดา มณีโรจน์ ประธานเจ้าหน้าที่บริหาร บริษัท เทสลา เพาเวอร์ จำกัด ที่ได้สนับสนุนหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการศึกษาค้นคว้าวิจัย

ขอขอบคุณ ดร.เพทาย นิรมสนอง และผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติศักดิ์ ถึงสุข ที่ได้ช่วยเหลือในการทดลองวิจัยและใช้สถานที่ในห้องปฏิบัติการวิจัยไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ขอขอบคุณสมาชิกในห้องปฏิบัติการวิจัยวิทยุอิมพัลส์แถบกว้างยิ่งทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ์ สุพรรณกุล ดร.ณัฐพันธ์ สุวรรณสุข คุณธนดณย์ มั่นคง คุณณัฐวุฒิ ศุภวิโรจน์เลิศ คุณทินภัทร ผงสูงเนิน คุณธนกฤต ภูแรศรี คุณธนิชฐ์ เกียรติขจรบรรพ คุณคมปกร นิตติอักษรธรรม และ คุณเจนภาพ จันทรพุ่ม ที่ช่วยเหลือในการทดลองวิจัยและให้กำลังใจอย่างดียิ่ง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้ที่อุทิศกายและใจในการเลี้ยงดูข้าพเจ้า นางสาวภาวิณี ดำรงโภคภัณฑ์ และนางสาวละอียด แซ่เล่า ผู้เปรียบเสมือนมารดาบุญธรรมทั้งสองของข้าพเจ้า ที่ให้การสนับสนุนในทุกด้านตลอดระยะเวลาการศึกษาและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดขึ้นจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้แก่ บิดา มารดา ครูบาอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ตลอดจนครอบครัวญาติสนิทมิตรสหายทุกท่านที่คอยให้การสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดระยะเวลาการศึกษา

ธนดล เตียงทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญตาราง..... | VII |
| สารบัญรูป..... | VIII |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 กล่าวนำ..... | 1 |
| 1.2 ความเป็นมาและความสำคัญ..... | 1 |
| 1.3 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์..... | 3 |
| 1.4 สมมุติฐานของวิทยานิพนธ์..... | 4 |
| 1.5 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัยในวิทยานิพนธ์..... | 4 |
| 1.6 โครงประกอบของวิทยานิพนธ์..... | 5 |
| บทที่ 2 การดิสซาร์จบางส่วน..... | 6 |
| 2.1 กล่าวนำ..... | 6 |
| 2.2 นิยามการดิสซาร์จบางส่วน..... | 6 |
| 2.2.1 ผลกระทบจากการเกิดการดิสซาร์จบางส่วน..... | 7 |
| 2.2.2 ชนิดของการเกิดการดิสซาร์จบางส่วน..... | 7 |
| 2.3 หลักการตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วน..... | 10 |
| 2.3.1 การตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วนด้วยวิธีดั้งเดิม (Conventional method)..... | 10 |
| 2.3.2 การตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วนด้วยวิธีแสง (Optical method)..... | 10 |
| 2.3.3 การตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วนด้วยวิธีเคมี (Chemical method)..... | 11 |
| 2.3.4 การตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วนด้วยวิธีเสียง (Acoustic method)..... | 11 |
| 2.3.5 การตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วนด้วยวิธีแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic method)..... | 11 |
| 2.4 มาตรฐานการตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วน..... | 12 |
| 2.4.1 มาตรฐาน IEC 60270..... | 12 |
| 2.4.2 มาตรฐาน IEC 62478..... | 12 |
| 2.4.3 มาตรฐาน CIGRE TB 496..... | 12 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 2.4.4 มาตรฐาน IEEE 2862-2020..... | 12 |
| 2.5 เทคโนโลยีความถี่สูงยิ่ง..... | 13 |
| 2.6 หม้อแปลงไฟฟ้า..... | 14 |
| 2.7 สรุป..... | 14 |
| บทที่ 3 แบบแผนการประเมินผลการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้า..... | 15 |
| 3.1 กล่าวนำ..... | 15 |
| 3.2 แบบจำลองการตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วน..... | 15 |
| 3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์..... | 16 |
| 3.3.1 การประยุกต์สูตรการส่งผ่านของฟรีสสำหรับการตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วน.. | 16 |
| 3.3.2 วงจรกรองแบบแมตซ์..... | 18 |
| 3.3.3 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน..... | 19 |
| 3.3.4 การสูญเสียเชิงวิถี..... | 20 |
| 3.4 สรุป..... | 21 |
| บทที่ 4 การทดลองการดิสซาร์จบางส่วน..... | 22 |
| 4.1 กล่าวนำ..... | 22 |
| 4.2 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย..... | 22 |
| 4.3 แบบจำลองการทดลอง..... | 22 |
| 4.3.1 แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง..... | 22 |
| 4.3.2 แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากรณีมีสิ่งกีดขวาง..... | 24 |
| 4.3.3 ขั้นตอนการทดลองวัด..... | 24 |
| 4.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... | 29 |
| 4.4.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์..... | 29 |
| 4.4.2 สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป..... | 29 |
| 4.5 แบบจำลองสัญญาณที่ใช้ในการทดลอง..... | 35 |
| 4.6 สรุป..... | 37 |
| บทที่ 5 ผลการทดลอง..... | 38 |
| 5.1 กล่าวนำ..... | 38 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 5.2 คุณลักษณะช่องสัญญาณการส่งผ่านของฟังก์ชันถ่ายโอน..... | 38 |
| 5.2.1 กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง..... | 38 |
| 5.2.2 กรณีมีสิ่งกีดขวาง..... | 42 |
| 5.2.3 วิจัยผลการทดลอง..... | 42 |
| 5.3 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน..... | 46 |
| 5.3.1 กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง..... | 46 |
| 5.3.2 กรณีมีสิ่งกีดขวาง..... | 50 |
| 5.3.3 วิจัยผลการทดลอง..... | 50 |
| 5.4 การสูญเสียเชิงวิถี..... | 54 |
| 5.4.1 กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง..... | 54 |
| 5.4.2 กรณีมีสิ่งกีดขวาง..... | 58 |
| 5.4.3 วิจัยผลการทดลอง..... | 58 |
| 5.5 สรุป..... | 62 |
| บทที่ 6 สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 63 |
| 6.1 กล่าวนำ..... | 63 |
| 6.2 สรุปผลการทดลอง..... | 63 |
| 6.3 ข้อเสนอแนะ..... | 65 |
| 6.4 การวิจัยในอนาคต..... | 65 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 67 |
| ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่ได้นำเสนอในระหว่างศึกษาระดับปริญญาเอก..... | 71 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 103 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.1 พารามิเตอร์ในการทดลองวัดการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้า..... | 27 |
| 6.1 การเปรียบเทียบผลการทดลองวิจัยระหว่างกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและกรณีมีสิ่งกีดขวาง..... | 65 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 1.1 ความเสียหายที่เกิดจากดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้า..... | 2 |
| 1.2 แผนภาพบล็อกของแบบจำลองฟังก์ชันถ่ายโอนสำหรับการตรวจหาดิสชาร์จบางส่วน..... | 5 |
| 2.1 การเกิดการดิสชาร์จบางส่วนแบบภายใน..... | 8 |
| 2.2 การเกิดโคโรนาดิสชาร์จ..... | 8 |
| 2.3 การเกิดดิสชาร์จตามผิว..... | 9 |
| 2.4 วิธีการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วน..... | 10 |
| 2.5 ช่วงความถี่การตรวจหาสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงประเภทต่าง ๆ..... | 11 |
| 2.6 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีความถี่สูงยิ่ง..... | 13 |
| 3.1 แผนภาพบล็อกของแบบจำลองฟังก์ชันถ่ายโอนในหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการตรวจหาการ ดิสชาร์จบางส่วน..... | 15 |
| 3.2 แผนภาพบล็อกของแบบจำลองฟังก์ชันถ่ายโอนในหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการตรวจหาการ ดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้วงจรกรองแบบแมตซ์..... | 16 |
| 3.3 ภาพตัดขวางการประวิงกำลังงาน..... | 19 |
| 4.1 แผนภาพบล็อกของขั้นตอนการศึกษาวิจัยการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใน หม้อแปลงไฟฟ้า..... | 23 |
| 4.2 แบบจำลอง 3 มิติ ในการทดลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้า แบบ 3 ระดับ สำหรับการทดลองหาการสูญเสียเชิงวิถี กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง..... | 23 |
| 4.3 แบบจำลอง 3 มิติ ในการทดลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้า แบบ 3 ระดับ สำหรับการทดลองหาการสูญเสียเชิงวิถี กรณีมีสิ่งกีดขวาง..... | 24 |
| 4.4 แผนภาพบล็อกของขั้นตอนการทดลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลง ไฟฟ้า..... | 25 |
| 4.5 แผนภาพบล็อกของขั้นตอนเปรียบเทียบ..... | 26 |
| 4.6 การจัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดลองการวัดสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 มิติ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง..... | 27 |
| 4.7 การจัดเตรียมอุปกรณ์ภายในหม้อแปลงที่ทำการติดตั้งสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปทั้งด้าน ส่งและด้านรับแบบ 3 มิติ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง..... | 28 |
| 4.8 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ ยี่ห้อ Agilent รุ่น E5061B..... | 29 |
| 4.9 ขนาดและโครงสร้างของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป..... | 30 |
| 4.10 วงจรสมมูลของสายอากาศไมโครสตริป..... | 30 |
| 4.11 แบบจำลองวิธีสามสายอากาศ..... | 31 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.12 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การสะท้อน $ S_{11} $ ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริประหว่างการจำลองและการทดสอบวัด..... | 32 |
| 4.13 การเปรียบเทียบอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแผ่นไมโครสตริประหว่างการจำลองและการทดสอบวัด..... | 33 |
| 4.14 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปในระนาบสนามไฟฟ้าระหว่างการจำลองและการทดสอบวัด..... | 33 |
| 4.15 การเปรียบเทียบอัตราขยายของสายอากาศแผ่นไมโครสตริประหว่างการจำลองและการทดสอบวัด..... | 34 |
| 4.16 การเปรียบเทียบฟังก์ชันถ่านโอนช่องสัญญาณของสายอากาศระหว่างการจำลองและการทดสอบวัด..... | 35 |
| 4.17 สัญญาณส่ง..... | 36 |
| 4.18 ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของสัญญาณส่ง..... | 36 |
| 5.1 ตัวอย่างการเปรียบเทียบคุณลักษณะของช่องสัญญาณฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx1 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง..... | 39 |
| 5.2 ตัวอย่างการเปรียบเทียบคุณลักษณะของช่องสัญญาณฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx2 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง..... | 40 |
| 5.3 ตัวอย่างการเปรียบเทียบคุณลักษณะของช่องสัญญาณฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง..... | 41 |
| 5.4 ตัวอย่างการเปรียบเทียบคุณลักษณะของช่องสัญญาณฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx1 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง..... | 43 |
| 5.5 ตัวอย่างการเปรียบเทียบคุณลักษณะของช่องสัญญาณฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx2 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง..... | 44 |
| 5.6 ตัวอย่างการเปรียบเทียบคุณลักษณะของช่องสัญญาณฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง..... | 45 |
| 5.7 ตัวอย่างการเปรียบเทียบภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx1 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง..... | 47 |
| 5.8 ตัวอย่างการเปรียบเทียบภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx2 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง..... | 48 |
| 5.9 ตัวอย่างการเปรียบเทียบภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง..... | 49 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 5.10 ตัวอย่างการเปรียบเทียบภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx1 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง..... | 51 |
| 5.11 ตัวอย่างการเปรียบเทียบภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx2 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง..... | 52 |
| 5.12 ตัวอย่างการเปรียบเทียบภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง..... | 53 |
| 5.13 ตัวอย่างการเปรียบเทียบการสูญเสียเชิงวิถีระหว่างไม่ใช้วงจรกรองแบบแมตซ์และใช้วงจรกรองแบบแมตซ์โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx1 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง..... | 55 |
| 5.14 ตัวอย่างการเปรียบเทียบการสูญเสียเชิงวิถีระหว่างไม่ใช้วงจรกรองแบบแมตซ์และใช้วงจรกรองแบบแมตซ์โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx2 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง..... | 56 |
| 5.15 ตัวอย่างการเปรียบเทียบการสูญเสียเชิงวิถีระหว่างไม่ใช้วงจรกรองแบบแมตซ์และใช้วงจรกรองแบบแมตซ์โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง..... | 57 |
| 5.16 ตัวอย่างการเปรียบเทียบการสูญเสียเชิงวิถีระหว่างไม่ใช้วงจรกรองแบบแมตซ์และใช้วงจรกรองแบบแมตซ์โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx1 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง..... | 59 |
| 5.17 ตัวอย่างการเปรียบเทียบการสูญเสียเชิงวิถีระหว่างไม่ใช้วงจรกรองแบบแมตซ์และใช้วงจรกรองแบบแมตซ์โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx2 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง..... | 60 |
| 5.17 ตัวอย่างการเปรียบเทียบการสูญเสียเชิงวิถีระหว่างไม่ใช้วงจรกรองแบบแมตซ์และใช้วงจรกรองแบบแมตซ์โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง..... | 61 |
| 6.1 แผนภาพบล็อกของแบบจำลองฟังก์ชันการถ่ายโอนในหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วน โดยเลือกใช้วงจรกรองแบบปรับค่าได้ (Adaptive filter)..... | 66 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

การตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้าและในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง มีความสำคัญอย่างมาก ในบทนี้จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญ วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์ สมมุติฐานและทฤษฎีที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ และเค้าโครงวิทยานิพนธ์ เพื่อให้สามารถทำความเข้าใจเนื้อหาส่วนอื่น ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ง่ายขึ้น

1.2 ความเป็นมาและความสำคัญ

การขยายตัวของสังคมเมืองในปัจจุบันทำให้มีความต้องการความมั่นคงทางพลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น พลังงานไฟฟ้าจำเป็นที่จะต้องมามีปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการใช้งานและมีความเสถียร ดังนั้นหากเกิดการเสียหายต่อหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญอย่างยิ่งในระบบไฟฟ้าแรงสูง จะทำให้เกิดผลกระทบต่อเศรษฐกิจและสังคมเป็นอย่างมาก การดิสชาร์จบางส่วนเป็นหนึ่งในสาเหตุสำคัญที่ทำให้หม้อแปลงไฟฟ้ารวมถึงอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงอื่น ๆ เกิดความเสียหาย การดิสชาร์จบางส่วนหมายถึงปรากฏการดิสชาร์จบางส่วนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ฉนวนบางส่วนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเกิดความเสียหายหรือมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งสามารถเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น ความชื้น ฟองอากาศ หรือเศษวัสดุแปลกปลอม เป็นต้น จากการที่ฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเกิดความผิดปกติ ทำให้บริเวณดังกล่าวมีความเครียดของสนามไฟฟ้าแตกต่างจากบริเวณอื่นและนำไปสู่การดิสชาร์จบางส่วนและเกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ดังกล่าวในที่สุด [1] รูปที่ 1.1 ได้แสดงให้เห็นถึงความเสียหายของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เกิดการดิสชาร์จบางส่วน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วน เพื่อให้สามารถป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นได้

การดิสชาร์จบางส่วนสามารถตรวจหาได้หลายวิธี เช่น ไฟฟ้า แสง เคมี เสียง และ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [2 - 5] โดยในปี ค.ศ. 2000 ได้มีการกำหนดมาตรฐาน IEC 60270 ที่กำหนดวิธีการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นวิธีการดั้งเดิม (Conventional method) และใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่ายต่อการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วน แต่วิธีการดังกล่าวยังมีข้อเสียจากการที่มีไวในการตรวจหาและความแม่นยำในการหาตำแหน่งที่ต่ำ [2] ต่อมาในปี ค.ศ. 2012 ได้มีการออกวิธีปฏิบัติ Cigré 502 ซึ่งเป็นการกำหนดแนวทางปฏิบัติในการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงด้วยวิธีการต่าง ๆ รวมถึงวิธีทางแม่เหล็กไฟฟ้า [3] ในปี ค.ศ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 ความเสียหายที่เกิดจากดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้า [1]

2016 ได้มีการกำหนดมาตรฐาน IEC/TS 62478 ขึ้นเพื่อให้เป็นมาตรฐานอ้างอิงในการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีแม่เหล็กไฟฟ้าและเสียง และได้กำหนดให้ใช้ช่วงความถี่สูง (High frequency: HF) ความถี่สูงมาก (Very high frequency: VHF) และความถี่สูงยิ่ง (Ultra high frequency: UHF) ในการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วน [4] และในปี ค.ศ. 2020 ได้มีมาตรฐาน IEEE 2862 ซึ่งได้อธิบายเกี่ยวกับขั้นตอนการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้เซนเซอร์ย่านความถี่สูงมากและความถี่สูงยิ่ง [5] วิธีทางแม่เหล็กไฟฟ้ามีข้อดี คือ เป็นวิธีการใหม่ ทนต่อสัญญาณรบกวนภายนอกได้ดี และมีความแม่นยำในการหาตำแหน่งสูงกว่าวิธีการอื่น [6] และ [7] โดยช่วงความถี่ที่นิยมใช้ในการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีแม่เหล็กไฟฟ้า คือ ช่วงความถี่สูงยิ่ง ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่มีการใช้งานอยู่อย่างแพร่หลายในระบบการสื่อสารไร้สาย [8] จากความสำคัญของการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วน จึงได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการดิสชาร์จบางส่วนอย่างกว้างขวาง โดยจะได้ยกตัวอย่างวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ใน [9] ได้นำเสนอแบบจำลองอย่างง่ายเพื่อใช้ในการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีการทางไฟฟ้า ต่อมาใน [10] ได้นำเสนอการศึกษากลไกการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน การตรวจหา และขั้นตอนการวัดการดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC 60270 ในปี ค.ศ. 2005 [11] ได้นำเสนอการแบบแผนการประเมินการวินิจฉัยการดิสชาร์จบางส่วนและสภาพนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า และใน [12] ได้นำเสนอการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนและการวินิจฉัยสถานะของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยเน้นกระบวนการทางไฟฟ้า

นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีทางเคมี (แก๊ส) แสง และเสียง [13 – 17] ใน [13] นำเสนอการวิเคราะห์การดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดในหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้การวิเคราะห์แก๊สที่อยู่ในฉนวนน้ำมันของหม้อแปลงไฟฟ้าและแสดงให้เห็นถึงความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

จากกระบวนการวิเคราะห์ [14] ได้นำเสนอการศึกษาคุณลักษณะของดิสชาร์จบางส่วนจากการสว่างเอกซเรย์เป็นเอกสรที่ส่งผ่านวัสดุที่โปร่งแสงในเพื่อการศึกษาดูเห็น เมื่ออยู่ภายใต้เห็นไปเซปรีเซชันตามการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแสงที่เกิดขึ้น ซึ่งช่วยให้เกิดความเข้าใจในปรากฏการณ์ของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้ดียิ่งขึ้น ต่อมาใน [15] และ [16] ได้นำเสนอการวิเคราะห์คลื่นที่เกิดจากเสียงในขณะที่มีการดิสชาร์จบางส่วน ทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างการดิสชาร์จบางส่วนกับคลื่นเสียงที่เกิดขึ้น และเป็นประโยชน์ในการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนผ่านการวิเคราะห์ด้วยเสียง และใน [17] ได้นำวิธีการวิเคราะห์การดิสชาร์จบางส่วนด้วยเสียงที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้าและสามารถหาตำแหน่งการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนได้ การตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีทางเคมี แสง และ เสียง เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วน แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดอยู่บ้าง ดังนั้นจึงได้มีการนำเสนอวิธีการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากเป็นการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนที่มีการรบกวนจากสัญญาณภายนอกต่ำและมีความไวต่อการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ดี

ใน [18] และ [19] ได้นำเสนอการศึกษาคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอุปกรณ์ GIS โดยใช้เซนเซอร์ความถี่สูงยิ่ง ใน [20] ได้ศึกษาพฤติกรรมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์สวิตช์เกียร์ (Switchgear) และใน [21] ได้นำเสนอการใช้งานร่วมกันระหว่างวิธีทางเสียงและแม่เหล็กไฟฟ้าในการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์สวิตช์เกียร์ ต่อมาใน [22] และ [23] ได้นำเสนอการตรวจหาและหาตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายในหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้วิธีทางเสียงและแม่เหล็กไฟฟ้า บนพื้นฐานของมาตรฐาน IEC 60270 และใน [24] ได้นำเสนอการใช้เซนเซอร์ความถี่สูงยิ่งในการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนภายในหม้อแปลงไฟฟ้าบนพื้นฐานของมาตรฐาน IEC/TS 62478 โดยพิจารณาจากสเปกตรัมของสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่รับได้ในโดเมนความถี่

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง มีการนำเสนอวิธีการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงอื่น ๆ ด้วยวิธีทางไฟฟ้า เคมี แสง เสียง และ แม่เหล็กไฟฟ้า โดยในวิธีแม่เหล็กไฟฟ้าได้มีการนำเสนอการวัดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าบนพื้นฐานของมาตรฐาน IEC 60270 และ IEC/TS 62478 แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มีวิธีการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยพิจารณาในกรณีที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอแบบแผนการประเมินผลการทดลองของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วน บนพื้นฐานของสูตรการส่งผ่านของฟรีส [25] และนำเสนอวงจรกรองแบบแมตซ์ที่ด้านรับเพื่อให้อัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio: SNR) สูงที่สุด

1.3 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้าตามข้อกำหนด IEC/TS 62478
 2. คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าและการประยุกต์ใช้งานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ศึกษาทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์บนพื้นฐานสูตรการส่งผ่านของฟรีส (Friis' transmission formula) และนำเสนอวงจรกรองแบบแมตช์ (Matched filter) เพื่อให้ได้ค่าอัตราส่วนของกำลังสัญญาณต่อกำลังสัญญาณรบกวนสูงสุดสำหรับระบบการตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
3. ออกแบบจำลองการวัดจริงของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลง
4. วิเคราะห์และประเมินผลเปรียบเทียบของฟังก์ชันการส่งผ่านการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่มีสิ่งกีดขวางและไม่มีสิ่งกีดขวาง

1.4 สมมติฐานของวิทยานิพนธ์

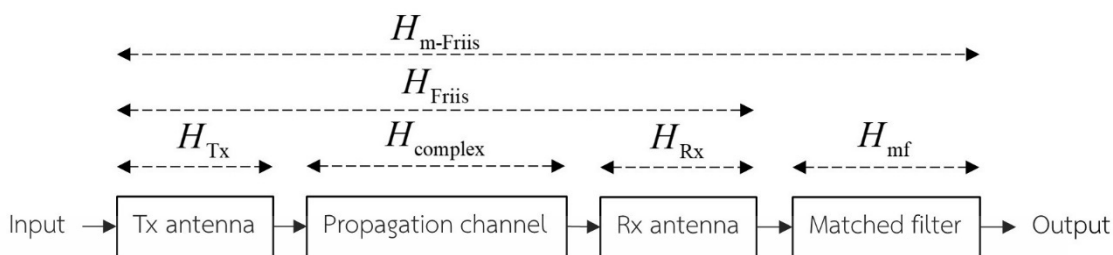
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาและการตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการพิจารณาฟังก์ชันการถ่ายโอนของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้า และทำการทดลองวัดช่องสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อออกแบบแบบแผนการประเมินผลการทดลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้า ในขั้นตอนการทดลองวัดได้กำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งของสายอากาศด้านส่งและรับ สภาพแวดล้อมภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวางภายในหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์ถึงผลที่เกิดขึ้นจากการมีสิ่งกีดขวางภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ทำให้สามารถประเมินผลการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าได้ จากการนำผลการทดลองมาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องบนพื้นฐานการประยุกต์ใช้สูตรการส่งผ่านของฟรีสและวงจรกรองแบบแมตช์ที่ด้านรับ อย่างไรก็ตามแบบจำลองการทดลองวัดการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังคงมีผลการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากสายส่งสัญญาณและขั้วต่อ แต่ก็ได้ถูกชดเชยลงโดยการทำการปรับเทียบอุปกรณ์ดังกล่าวก่อนการทดลอง ผลจากการทดลองวัดสามารถนำมาใช้ในการประเมินผลการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อประยุกต์ใช้ในการตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้าได้

1.5 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัยในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาทฤษฎีการดิสซาร์จบางส่วนและวิธีตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พิจารณาเลือกใช้วิธีแม่เหล็กไฟฟ้าในการศึกษาวิจัยเนื่องจากเป็นวิธีใหม่และเป็นวิธีที่มีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนภายนอกน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้วิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าบนพื้นฐานของสูตรการส่งผ่านของฟรีสและนำเสนอวงจรกรองแบบแมตช์ทางด้านรับดังที่แสดงในรูปที่ 1.2 และใช้ความถี่ 2.4 จิกะเฮิรตซ์ในการทดลองวิจัยเนื่องจากเป็นความถี่ที่สอดคล้องกับมาตรฐาน IEC TS 62478 [4]

ซึ่งเป็นมาตรฐานเกี่ยวกับวิธีตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วนด้วยวิธีแม่เหล็กไฟฟ้าและเป็นความถี่ในแถบ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนพณิชยการศรีนครินทร์ เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นต้นในการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISM Band [8] ทำให้ไม่ต้องขออนุญาตในการใช้งาน โดยในแบบจำลองการทดลองได้แบ่งออกเป็นกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง



รูปที่ 1.2 แผนภาพบล็อกของแบบจำลองฟังก์ชันถ่ายโอนสำหรับการตรวจหาดีสชาร์จบางส่วน [26]

1.6 โครงประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท มีบทนำอยู่ในบทที่ 1 เป็นการกล่าวที่มาและความสำคัญ หลักการเบื้องต้น และวัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์ ส่วนรายละเอียดของบทต่าง ๆ อีก 5 บทมีดังต่อไปนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงเทคโนโลยีการดีสชาร์จบางส่วน ประกอบไปด้วยนิยามของการดีสชาร์จบางส่วน ผลกระทบจากการเกิดการดีสชาร์จบางส่วน ชนิดของการเกิดการดีสชาร์จบางส่วน หลักการตรวจหาการดีสชาร์จบางส่วน มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง เทคโนโลยีความถี่สูงยิ่ง และเทคโนโลยีหม้อแปลงไฟฟ้า

บทที่ 3 กล่าวถึงหลักการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้า รายละเอียดเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้สูตรการส่งผ่านของฟรีส วงจรกรอบแบบแมตซ์ ภาพตัดขวางการประวิงกำลังงานและการสูญเสียเชิงวิถี

บทที่ 4 อธิบายถึงแบบจำลองการทดลองวัดการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ขั้นตอนการทดลอง อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง รูปคลื่นของสัญญาณที่ใช้ในการทดลอง

บทที่ 5 ผลการทดลองวัดการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยพิจารณา คุณสมบัติของฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ภาพตัดขวางการประวิงกำลังงาน และการสูญเสียเชิงวิถี

บทที่ 6 บทสรุปและเสนอแนะผลการศึกษาวิจัยและทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทั้งหมด พร้อมทั้งได้เสนอแนะแนวทางในการศึกษาและพัฒนา ให้แก่ผู้ที่สนใจต่อไป

บทที่ 2

การดิสชาร์จบางส่วน

2.1 กล่าวนำ

จากที่มาและความสำคัญที่ได้กล่าวไว้ในบทก่อนหน้า แสดงให้เห็นถึงความจำเป็นที่ต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการดิสชาร์จบางส่วน ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเพื่อเพิ่มความเข้าใจในเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการดิสชาร์จบางส่วนจะได้กล่าวถึงนิยาม ประวัติและความเป็นมาของการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วน มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วน เทคโนโลยีความถี่สูงยิ่ง และหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อให้การศึกษาวิจัยการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2 นิยามการดิสชาร์จบางส่วน

การดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge: PD) คือ ปรากฏการณ์ที่ฉนวนบางส่วนในระบบฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเกิดการเสื่อมสภาพและมีลักษณะคล้ายตัวเก็บประจุแฝง ทำให้เกิดการดิสชาร์จที่ไม่ได้เชื่อมโยงถึงกันระหว่างขั้วไฟฟ้า (Electrode) [2] ซึ่งอาจเกิดขึ้นในฉนวนก๊าซ ฉนวนเหลว หรือฉนวนแข็ง เมื่อเกิดการดิสชาร์จบางส่วนขึ้นจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ตามมา คือ แสง เสียง กระแสพัลส์ไฟฟ้า กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริกส์ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไฟฟ้าย่านความถี่สูง ปฏิกริยาเคมี และความร้อน จึงถือว่าไม่ได้เป็นการเสียหายการเป็นฉนวนสมบูรณ์ทั้งระบบ การเกิดการดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอ ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และมีสิ่งเจือปน ที่ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดสูงกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตและอาจจะทำให้เกิดการเบรกดาวน์ทั้งระบบได้ [6] และ [7]

การดิสชาร์จบางส่วนสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในระบบไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ แต่ในกรณีระบบไฟฟ้ากระแสสลับการดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นเป็นรอบซ้ำ ๆ ตามรอบของแรงดันไฟฟ้าในระบบ ซึ่งมักทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วนขณะที่แรงดันป้อนเพิ่มจากศูนย์ไปสู่ค่ายอด การดิสชาร์จบางส่วนในแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวนในลักษณะชนกระแทกเป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุดมีผลทำให้ฉนวนเสียเป็นจุด ๆ และเกิดความผิดพลาดขยายตัวมากขึ้น อาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ได้ ทำให้ฉนวนเกิดความเสียหายและอายุการใช้งานของฉนวนจะลดลง ซึ่งในการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนจะให้สัญญาณในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ผลทางไฟฟ้า แสง เสียง รั้งสีปฏิกริยาเคมี และแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น

2.2.1 ผลกระทบจากการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน

การเกิดการดิสชาร์จบางส่วนนั้นได้กลายเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อฉนวนนวน นั่นคือ การเกิดรอยไหม้ (Tracking) บนฉนวนนวน การเกิดรอยไหม้จากฉนวนที่ตรงใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่อยู่ภายนอกอาคาร บริเวณผิวของฉนวนนั้นนับว่าเป็นแหล่งสะสมของสิ่งสกปรกทั้งหลาย ซึ่งสิ่งสกปรกเหล่านี้จะทำหน้าที่ดูดซับความชื้นจากอากาศโดยรอบทำให้เกิดเป็นชั้นบาง ๆ ที่เปียกและกลายเป็นคราบสิ่งสกปรกเกาะอยู่ตามพื้นผิวฉนวน คราบสิ่งสกปรกเหล่านี้เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดส่วนที่นำไฟฟ้าขึ้นบริเวณผิว ดังนั้นกระแสจึงสามารถวิ่งไหลผ่านไปบนฉนวนระหว่างด้านแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากับด้านที่ต่อลงดินได้หรือที่เรียกว่า กระแสรั่ว (Leakage Current) ค่าความต้านทานของฉนวนจึงลดลงอย่างมากเมื่อมีสิ่งสกปรกและความชื้น ความต้านทานที่ต่ำลงนั้นในทางกลับกันจะทำให้กระแสรั่วบนผิวมีค่าสูงขึ้น มีการขยายตัวเร็วขึ้นและมีพลังงานมากพอที่จะทำลายฉนวนวัสดุ เนื่องจากการสูญเสียความชื้นของฉนวนโดยความร้อนของกระแสรั่วที่ไหลผ่านนั้น จะไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ทำให้นำไปสู่การสร้างพื้นที่แห้งขนาดเล็ก ในหลายบริเวณเมื่อพื้นที่แห้งขนาดเล็กเหล่านี้ได้ก่อตัวขึ้นการไหลของกระแสรั่วก็จะถูกขัดขวางจึงเปรียบเสมือนเป็นความต้านทานที่มีค่าสูงมากส่งผลให้ความเครียดทางไฟฟ้าบริเวณพื้นที่แห้งดังกล่าวสูงตามไปด้วย เมื่อค่าความเครียดที่บริเวณพื้นที่แห้งขนาดเล็กสูงขึ้นจนทำให้อากาศบริเวณนั้นเกิดการแตกตัวเป็นไอออนหรือเกิดปรากฏการณ์ไอออไนเซชัน (Ionization) ทำให้อากาศกลายเป็นตัวนำไฟฟ้าจนมีพลังงานมากพอที่จะทำให้เกิดเส้นประกายไฟขึ้นที่บริเวณพื้นที่แห้งที่กระจายอยู่ในหลายบริเวณบนฉนวน เรียกเหตุการณ์นี้ว่า การเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วนดังรูปที่ 2.4 ส่งผลให้พื้นที่นั้นมีความร้อนสูงขึ้นตามระดับความรุนแรงของดิสชาร์จไฟฟ้าจนกระทั่งทำให้ฉนวนวัสดุไม่สามารถทนได้จึงเกิดเป็นรอย

2.2.2 ชนิดของการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน

การดิสชาร์จบางส่วนแบ่งออกเป็น 3 ชนิดหลักคือ

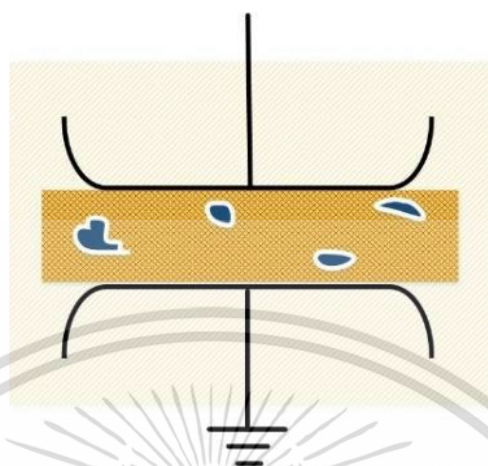
2.2.2.1 การดิสชาร์จบางส่วนแบบภายใน

การดิสชาร์จบางส่วนแบบภายใน (Internal Discharge) เกิดขึ้นในเนื้อฉนวนที่มีสิ่งเจือปน ซึ่งสิ่งเจือปนนั้นมีค่าไดอิเล็กตริกต่ำและความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่นจึงทำให้บริเวณนี้เกิดเบรกดาวน์ก่อน การดิสชาร์จบางส่วนแบบภายในเกิดขึ้นเนื่องมาจากมีโพรงอากาศหรือสิ่งแปลกปลอมที่มีค่าสภาพยอมต่ำกว่าเนื้อฉนวนหลักเจือปนอยู่ในเนื้อฉนวนแข็งหรือฉนวนเหลว (น้ำมันหม้อแปลง) ดังรูปที่ 2.1 ส่งผลให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงอากาศหรือสิ่งเจือปนดังกล่าวมีค่าสูงกว่าฉนวนรอบ ๆ การดิสชาร์จบางส่วนแบบภายในสามารถเกิดในพลาสติก กระดาษฉนวน และน้ำมันฉนวนเรซิน เป็นต้น ขนาดของแรงดันที่ดิสชาร์จเริ่มเกิดได้ขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงอากาศและความคงทนต่อการเบรกดาวน์ของโพรงอากาศ โดยที่ความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงอากาศขึ้นอยู่กับความเข้มของสนามไฟฟ้า ซึ่งความเข้มสนามไฟฟ้าขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันสูงรูปร่างของโพรงอากาศ และทิศทางของความเข้มสนามไฟฟ้าสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าความทนต่อ

แรงดันเบรกดาวน์ของโพรงอากาศขึ้นอยู่กับขนาดของโพรงอากาศ นอกจากนี้ความทนต่อแรงดันเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

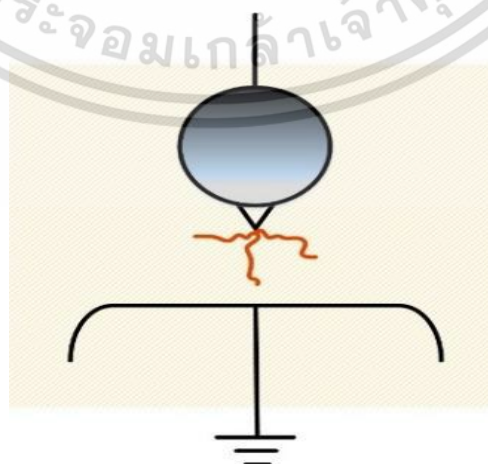
เบรกดาวนั้ถูกกำหนดโดยชนิดของแก๊สและความดันแก๊สในโพรงอากาศ การดิสชาร์จบางส่วนแบบภายในสามารถทำความเสียหายแก่ฉนวนได้ โดยขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและขนาดของดิสชาร์จ



รูปที่ 2.1 การเกิดการดิสชาร์จบางส่วนแบบภายใน [6]

2.2.2.2 โครโนาดิสชาร์จ

โครโนาดิสชาร์จ (Corona Discharge) เกิดขึ้นได้ในอากาศหรือแก๊ส บริเวณอิเล็กโทรดปลายแหลมหรือลักษณะขอบคม ซึ่งมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง นอกจากนี้โครโนาดิสชาร์จสามารถเกิดในน้ำมันได้เช่นกัน โครโนาดิสชาร์จสามารถจำลองได้โดยใช้อิเล็กโทรดปลายแหลมกับอิเล็กโทรดระนาบ โดยในการจำลองถ้าให้อิเล็กโทรดปลายแหลมเป็นด้านแรงสูงและให้อิเล็กโทรดระนาบเป็นด้านต่อลงดินดังรูปที่ 2.2 ดิสชาร์จจะเกิดขึ้นด้านครึ่งลบของรูปคลื่นแรงดันและถ้าเพิ่มแรงดันขึ้นอีกก็จะเกิดทั้งครึ่งลบและครึ่งบวกของรูปคลื่นแรงดัน ถ้าอิเล็กโทรดปลายแหลมเป็นด้านต่อลงดินและให้อิเล็กโทรดระนาบเป็นด้านแรงสูง ดิสชาร์จก็จะเกิดขึ้นที่ครึ่งบวกของรูปคลื่นแรงดันก่อน



รูปที่ 2.2 การเกิดโครโนาดิสชาร์จ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.3 ดิสชาร์จตามผิว

ดิสชาร์จตามผิว (Surface Discharge) มักจะเกิดขึ้นถ้าผิวฉนวนบริเวณนั้นมีความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวขนานหรือแนวเดียวกันกับผิวฉนวน ดิสชาร์จตามผิวเกิดขึ้นได้กับปลอกฉนวนนำสาย และปลายสายเคเบิล เป็นต้น ดิสชาร์จส่งผลกระทบต่อสนามไฟฟ้าเป็นผลให้ดิสชาร์จแผ่ขยายออกจากบริเวณพื้นผิว (บริเวณแรกที่ดิสชาร์จเริ่มเกิด) ที่องค์ประกอบพื้นผิวแรกเริ่มของสนามไฟฟ้ามีค่าสูงพอที่จะทำให้เกิดดิสชาร์จ ดิสชาร์จตามผิวเกิดได้ทั้งในอากาศ ในน้ำมันฉนวน และในซัลเฟอร์เฮกซาฟลูออไรด์ (Sulfur Hexafluoride: SF₆) ดิสชาร์จตามผิวอาจเกิดตามแนวรอยต่อของฉนวนต่างชนิดกัน (ของแข็งกับแก๊สหรือของแข็งกับของเหลว) เมื่อมีความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวรอยต่อของฉนวนสูงเกินค่าวิกฤต ตัวอย่างในการศึกษาการเกิดดิสชาร์จตามผิวทำ โดยการนำแผ่นฉนวนวางคั่นระหว่างอิเล็กโทรดดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การเกิดดิสชาร์จตามผิว [6]

จากรูปที่ 2.3 ดิสชาร์จตามผิวเกิดขึ้นบริเวณที่อิเล็กโทรดทรงกระบอกหรืออิเล็กโทรดทรงกลมสัมผัสกับแผ่นฉนวน เพราะบริเวณดังกล่าวมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้นตาม ดิสชาร์จจะขยายตัวออกไปยังขอบของแผ่นฉนวน ถ้าแผ่นฉนวนมีความหนาพอและแผ่นไม่กว้างเกินไปก็จะเกิดจุดวาบไฟข้ามแผ่นฉนวนไปหาอิเล็กโทรดระนาบได้หรือแผ่นฉนวนมีความหนาน้อยและแผ่นกว้างมาก ดิสชาร์จตามผิวจะเกิดเป็นบริเวณกว้างในระดับหนึ่งแล้วเกิดเบรกดาวน์เจาะทะลุแผ่นฉนวนได้ เมื่อทำการพิจารณาค่าสภาพยอมของฉนวนแข็งที่มีค่าสูงกว่าค่าสภาพยอมของอากาศหลายเท่าทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นฉนวน C₂ มีค่ามากกว่าค่าความจุไฟฟ้าของอากาศ C₁ ดังนั้นตามหลักการของโวลเตจดีไวเดอร์ (Voltage Dividers) แบบตัวเก็บประจุแรงดันตกคร่อม C₁ จึงมากกว่า ซึ่งหมายถึงค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนนั้นมีค่าสูงกว่าและเมื่อเพิ่มแรงดันมากพอที่จะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณดังกล่าวเกินค่าวิกฤต ก็จะเริ่มเกิดการดิสชาร์จบางส่วนและเมื่อเพิ่มแรงดันสูงกว่าค่าแรงดันโคโรนา

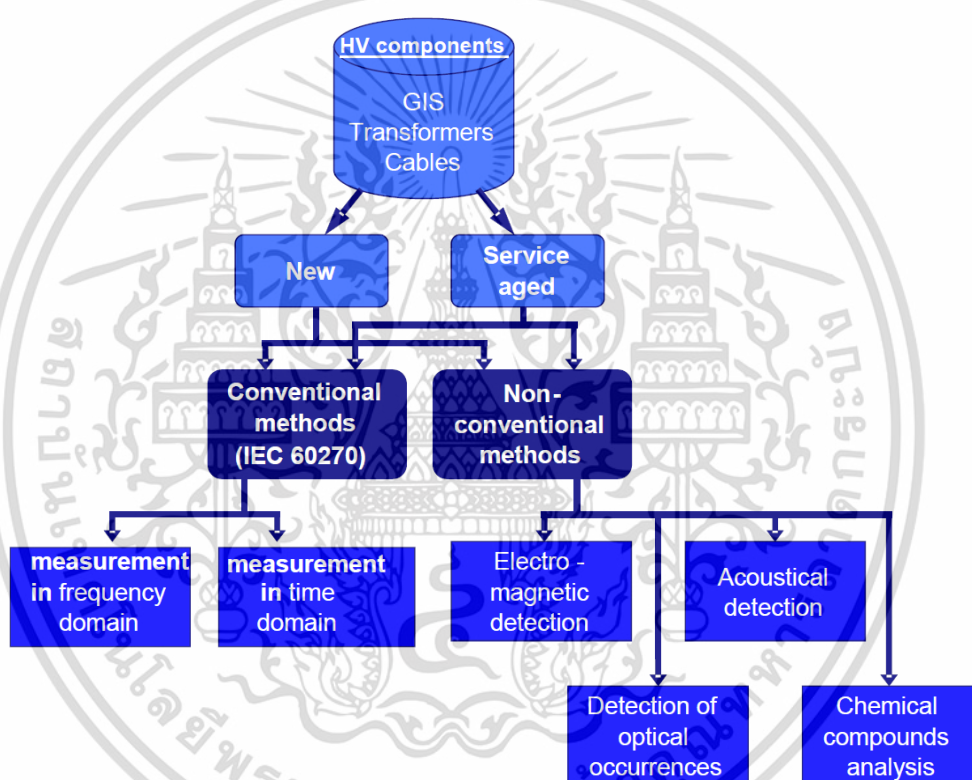
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เริ่มเกิด (Inception Voltage) ก็จะทำให้เกิดดิสชาร์จไปตามผิวฉนวน ความเข้มของดิสชาร์จตามผิวจะขึ้นอยู่กับค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นฉนวนแข็ง C2 ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นฉนวนนี้ขึ้นอยู่กับความหนาและค่าสภาพยอมของแผ่นฉนวน [7]

2.3 หลักการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วน

การตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนสามารถแบ่งได้จากพิจารณาปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ของการดิสชาร์จบางส่วน โดยสามารถแบ่งได้สองวิธีหลักคือ วิธีดั้งเดิม (Conventional method) และวิธีไม่ดั้งเดิม (Non-conventional method) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วิธีการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วน [3]

2.3.1 การตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีดั้งเดิม (Conventional method)

วิธีการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีดั้งเดิมเป็นการทำตามข้อแนะนำในมาตรฐาน IEC 60270 [2] โดยอาศัยหลักการของตัวเก็บประจุเชื่อมต่อการหาค่าประจุที่ปรากฏ ซึ่งสามารถนำไปคำนวณและวิเคราะห์เพิ่มเติมได้ต่อไป

2.3.2 การตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีแสง (Optical method)

วิธีการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนด้วยแสงจะอาศัยหลักการของการตรวจจับแสงที่เกิดจากการไอออนไนเซชันของการดิสชาร์จบางส่วน การกระตุน การรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอน ที่เกิดขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างการเกิดการดิสชาร์จบางส่วน โดยสามารถทำการวิเคราะห์ที่ได้จากการพิจารณาปริมาณของแสง และความยาวคลื่นของแสง [3]

2.3.3 การตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีเคมี (Chemical method)

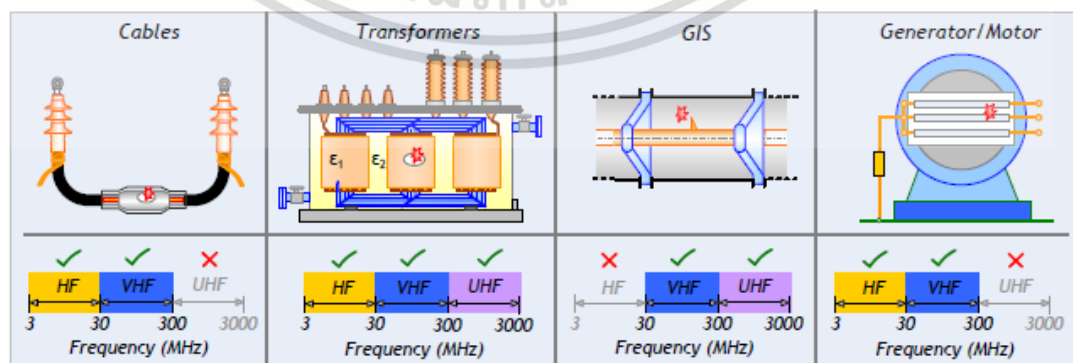
วิธีการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนด้วยปฏิกิริยาทางเคมีจะอาศัยหลักการตรวจผลทางเคมีที่มีการเปลี่ยนแปลงไปของฉนวน โดยสามารถทำการวิเคราะห์การเกิดการดิสชาร์จบางส่วนได้จากการวิเคราะห์แก๊สในเนื้อฉนวน (Dissolve gas analysis: DGA) ซึ่งสามารถใช้ในการตรวจหาการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนได้จากการทราบความเข้มข้นและปริมาณของแก๊สที่เกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ไม่สามารถระบุจำนวนและตำแหน่งที่เกิดการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนได้ [3]

2.3.4 การตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีเสียง (Acoustic method)

วิธีการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนด้วยเสียง เป็นการอาศัยหลักของการตรวจจับคลื่นเสียงที่เกิดขึ้นในขณะที่มีการดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้น โดยความแม่นยำในการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับชนิดของฉนวนที่ใช้ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อความเร็วของคลื่นเสียง นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงตำแหน่งที่ติดตั้งเซนเซอร์ เนื่องจากการสะท้อน การหักเห การแทรกสอดและการดูดซับคลื่นเสียงจะส่งผลกระทบต่อผลการวัด [4]

2.3.5 การตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic method)

วิธีการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า มีหลักในการทำงานโดยการตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการเกิดการดิสชาร์จบางส่วนและแพร่กระจายออกไปภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งสามารถใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่สูง ความถี่สูงมาก และความถี่สูงยิ่ง [3] และ [4] โดยสามารถใช้สายอากาศในย่านความถี่ดังกล่าวมาใช้ในการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนได้ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.5 โดยในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงแต่ละประเภทจะมีช่วงความถี่ในการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนแตกต่างกัน เนื่องจากชนิดของวัสดุและฉนวนของอุปกรณ์แต่ละประเภทมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน



✓ symbol indicates suitable, ✗ symbol indicates not suitable

รูปที่ 2.5 ช่วงความถี่การตรวจหาสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงประเภทต่าง ๆ [7]
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเชิงงานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังบุคคลอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 มาตรฐานการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วน

2.4.1 มาตรฐาน IEC 60270

มาตรฐาน IEC 60270 (IEC 60270 High-voltage test techniques - Partial discharge measurements) เป็นมาตรฐานที่ถูกกำหนดโดยคณะกรรมการอิเล็กทรอนิกส์คอลลานาชาติ เพื่อใช้เป็นข้อกำหนดและแนวทางในการวัดการดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทั้งไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ โดยมาตรฐาน IEC 60270 เป็นมาตรฐานที่กำหนดวิธีตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางเป็นมาตรฐานแรก ดังนั้นวิธีตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนที่ระบุในมาตรฐานนี้จึงนิยมเรียกว่าวิธีดั้งเดิม [2]

2.4.2 มาตรฐาน IEC TS 62478

มาตรฐาน IEC TS 62478 (IEC TS 62478 High voltage test techniques – Measurement of partial discharge by electromagnetic and acoustic method) เป็นอีกหนึ่งมาตรฐานที่ถูกกำหนดขึ้นเพื่อให้เป็นแนวทางเพิ่มเติมในการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วน โดยพิจารณาให้ใช้วิธีแม่เหล็กไฟฟ้าและเสียง และได้กำหนดขอบเขตและเงื่อนไขในการใช้งาน เช่น การกำหนดช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานได้ ชนิดของเซนเซอร์ที่ใช้ วิธีการวัดและวิเคราะห์การดิสชาร์จบางส่วน [4]

2.4.3 มาตรฐาน CIGRE TB 502

มาตรฐาน CIGRE TB 502 (CIGRE TB 502 High-Voltage On-Site Testing with Partial Discharge Measurement) ได้ระบุถึงเทคนิคและขั้นตอนการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงในสถานที่ต่างๆ ร่วมกับการวัดการดิสชาร์จบางส่วน รวมถึงพื้นฐานเกี่ยวกับระบบทดสอบและขั้นตอนการทดสอบต่างๆ อธิบายคุณลักษณะเฉพาะสำหรับการทดสอบระบบไฟฟ้าแรงสูง เช่น ระบบฉนวนก๊าซ (GIS/GIL) ระบบเคเบิล เครื่องหมุน และหม้อแปลงไฟฟ้า มีการกำหนดข้อกำหนดสำหรับการทดสอบในสถานที่ดังกล่าวด้วยการวัดการดิสชาร์จบางส่วน แสดงตัวอย่างทั่วไปและแสดงวิธีดำเนินการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ในสถานที่ให้ประสบความสำเร็จด้วยการวัดการดิสชาร์จบางส่วน บน GIS/GIL ระบบเคเบิล เครื่องหมุน และหม้อแปลงไฟฟ้า [3]

2.4.4 มาตรฐาน IEEE 2862-2020

มาตรฐาน IEEE 2862-2020 (2862-2020 - IEEE Recommended Practice for Partial Discharge Measurements under AC Voltage with VHF/UHF Sensors during Routine Tests on Factory and Pre-Molded Joints of HVDC Extruded Cable Systems up to 800 kV) ได้แนะนำแนวทางปฏิบัติที่ดีที่สุดสำหรับการวัดการดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและเซ็นเซอร์แม่เหล็กไฟฟ้า VHF/UHF สำหรับการควบคุมคุณภาพระหว่างการทดสอบตามปกติในโรงงานและข้อต่อก่อนขึ้นรูปของระบบสายเคเบิลอัดขึ้นรูป HVDC ที่มีแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 800 kV แนวทางปฏิบัติที่แนะนำนี้กล่าวถึงปรากฏการณ์ทั้งหมดของการดิสชาร์จบางส่วน แทนที่จะเป็นเพียง

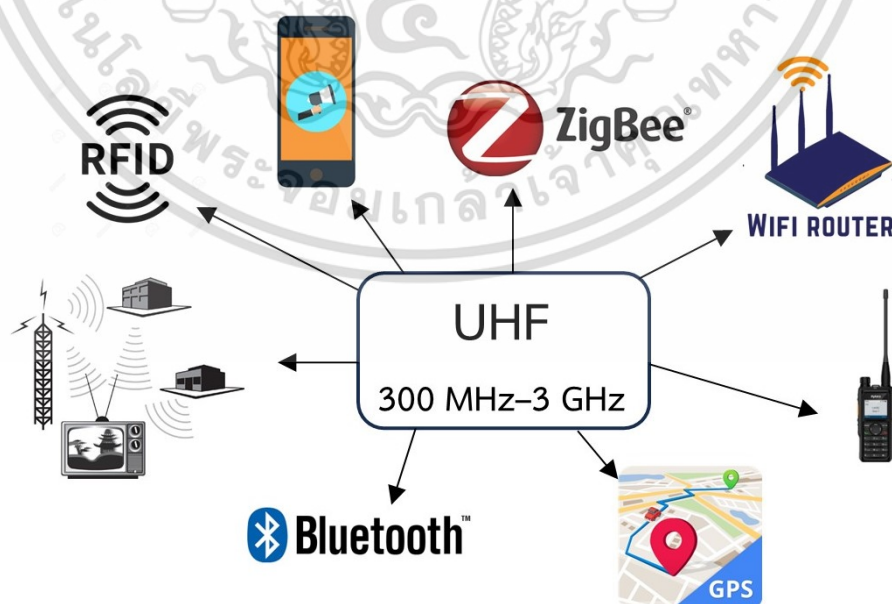
แอมพลิจูดของพัลส์การดิสชาร์จบางส่วน เพื่อประเมินว่ามีการดิสชาร์จบางส่วนที่สำคัญในวัตถุที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบหรือไม่ ระบบ). โดย "การดิสชาร์จบางส่วนที่สำคัญ" หมายถึงการดิสชาร์จในฉนวนของวัตถุที่ทดสอบ ยกเว้นการดิสชาร์จภายนอกทั้งหมดที่สามารถทำได้ในระหว่างการทดสอบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เช่น การปลดปล่อยโคโรนาเนื่องจากอิเล็กโทรด HV สายนำ ฯลฯ ที่เกี่ยวข้องกับการตั้งค่าการทดสอบ [5]

2.5 เทคโนโลยีการสื่อสารความถี่สูงยิ่ง

ความถี่สูงยิ่ง (Ultra-High Frequency: UHF) หมายถึงแถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union: ITU) [8] กำหนดไว้สำหรับคลื่นวิทยุในช่วงระหว่าง 300 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 3 กิกะเฮิร์ตซ์ หรือที่เรียกว่า ย่านเดซิเมตร (Decimetre Band) เนื่องจากมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 1 เมตร ถึง 0.1 เมตร (1 เดซิเมตร) ความถี่สูงยิ่งมักส่งแบบคลื่นตรงเป็นหลัก ซึ่งมักจะโดนปิดกั้นด้วยเนินเขาและอาคารขนาดใหญ่แม้ว่าการส่งผ่านกำแพงอาคารจะมีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการรับสัญญาณในร่มก็ตาม ความถี่สูงยิ่งใช้สำหรับการออกอากาศโทรทัศน์ โทรศัพท์เคลื่อนที่ การสื่อสารผ่านดาวเทียม ซึ่งรวมถึงจีพีเอส บริการวิทยุส่วนบุคคล รวมถึงไวไฟ บลูทูธ เครื่องส่งรับวิทยุ โทรศัพท์ไร้สาย และแอปพลิเคชันอีกมากมาย

สัญญาณวิทยุความถี่สูงยิ่งใช้ในหลายด้านรวมถึงการสื่อสารผ่านดาวเทียม GPS Wi-Fi บลูทูธ เครื่องส่งรับวิทยุ โทรศัพท์ไร้สาย โทรศัพท์มือถือ และการแพทย์โทรทัศน์ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.6 ข้อได้เปรียบอย่างมากของการส่งความถี่สูงยิ่งคือ ความยาวคลื่นสั้นที่สร้างโดยความถี่สูง ขนาดของคลื่นวิทยุเกี่ยวข้องโดยตรงกับความยาวของการส่งสัญญาณเช่นเดียวกับสายอากาศรับสัญญาณ โดยทั่วไปสายอากาศความถี่สูงยิ่งจะสั้นและกว้าง



รูปที่ 2.6 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีความถี่สูงยิ่ง [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการวิจัยเท่านั้นเพื่อวัตถุประสงค์เท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นแก่ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 หม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากระดับแรงดันหนึ่ง ไปสู่อีกแรงดันหนึ่ง อาจจะทำลง สูงขึ้น หรือเท่าเดิมก็ได้ หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าจะอาศัย การเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวด ซึ่งมีสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ส่วนประกอบสำคัญของหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบไปด้วย แกนเหล็กสำหรับเป็นทางเดินของฟลักซ์ แม่เหล็ก ขดลวดสำหรับป้อนแรงดันเข้าและจ่ายแรงดันออก และฉนวนสำหรับป้องกันการลัดวงจร และระบายความร้อน

หม้อแปลงไฟฟ้าจำเป็นต้องได้รับการทดสอบอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้แน่ใจว่าหม้อแปลงไฟฟ้า ที่ถูกผลิตขึ้นมานั้นมีประสิทธิภาพในการทำงานได้ดีเพียงใดและมีสภาพการใช้งานที่ปลอดภัยหรือไม่ ซึ่งการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือการทดสอบที่ต้องทำประจำ (Routine test) การทดสอบเฉพาะลักษณะบางประการของหม้อแปลงไฟฟ้า (Type test) และการ ทดสอบลักษณะพิเศษของหม้อแปลงที่อยู่นอกเหนือจาก 2 ประเภทที่กล่าวข้างต้น (Special test) สำหรับการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนจัดเป็นการทดสอบความคงทนของฉนวน ซึ่งสามารถจัดให้ อยู่ใน การทดสอบได้ทั้ง 3 ประเภท เนื่องจากการทดสอบความคงทนของฉนวนสามารถจำแนกออกได้ อีกหลายชนิด [12]

2.7 สรุป

บทนี้ได้กล่าวถึงการศึกษาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการดิสชาร์จบางส่วน โดยอธิบายถึงนิยาม ของการดิสชาร์จบางส่วน การตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีต่าง ๆ และมาตรฐานการตรวจหา การดิสชาร์จบางส่วนที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงเทคโนโลยีความถี่สูงยิ่ง ซึ่งถูกกำหนดให้สามารถใช้เป็นช่วงความถี่ที่เหมาะสมในการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธี แม่เหล็กไฟฟ้าได้ สุดท้ายได้กล่าวถึงหม้อแปลงไฟฟ้าและการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อให้เป็น พื้นฐานและเข้าใจถึงความสำคัญของการตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยการ แพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลง ซึ่งแบบแผนการประเมินผลการแพร่กระจายคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าได้แสดงไว้ในบทที่ 3

บทที่ 3

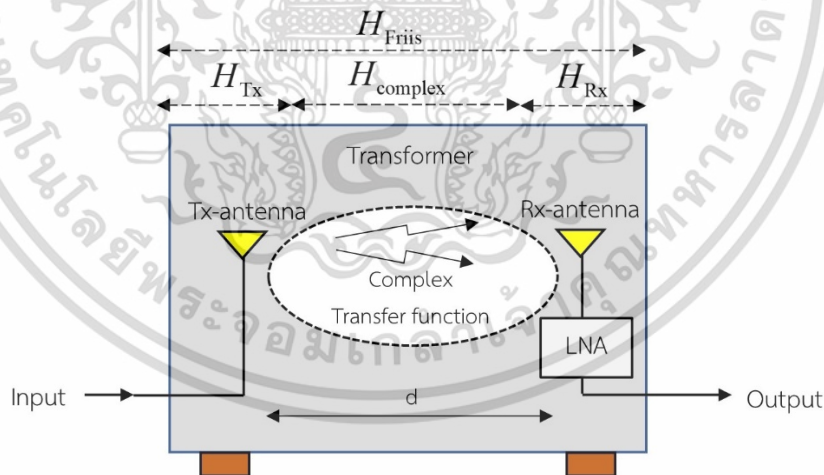
แบบแผนการประเมินผลการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้า

3.1 กล่าวนำ

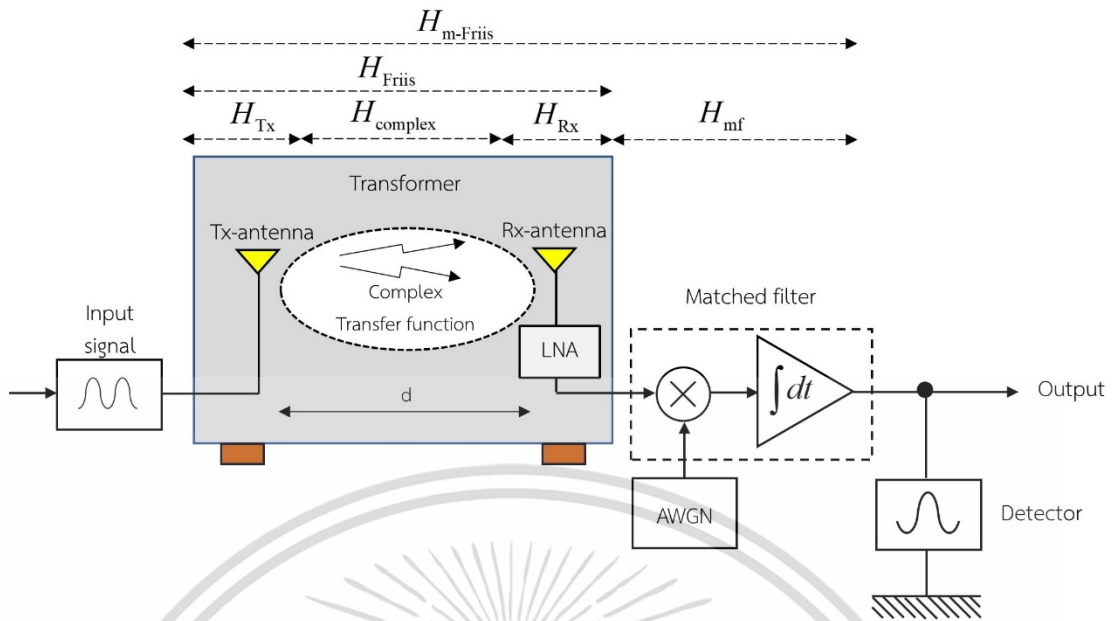
การศึกษาตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วนด้วยวิธีการอื่นและวิธีแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 และในบทนี้ได้อธิบายถึงขั้นตอนการวิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนผ่านการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ แบบจำลองการตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วน และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2 แบบจำลองการตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วน

ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถทำได้โดยการพิจารณาจากแบบจำลองฟังก์ชันถ่ายโอนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และการประยุกต์ใช้สมการการส่งผ่านของฟรีส โดยสามารถแบ่งองค์ประกอบของแบบจำลองออกเป็น ฟังก์ชันถ่ายโอนของสัญญาณอินพุต ฟังก์ชันถ่ายโอนของสายอากาศส่ง ฟังก์ชันถ่ายโอนของอวกาศว่าง ฟังก์ชันถ่ายโอนของสายอากาศรับ ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพบล็อกของแบบจำลองฟังก์ชันถ่ายโอนในหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วน



รูปที่ 3.2 แผนภาพบล็อกของแบบจำลองฟังก์ชันถ่ายโอนในหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วนโดยใช้วงจรกรองแบบแมตช์

3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.3.1 การประยุกต์สูตรการส่งผ่านของฟรีสสำหรับการตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วน

ในระบบแบบแถบแคบ การแพร่กระจายในอวกาศว่างปกติถูกประเมินค่าโดยสูตรการส่งผ่านสัญญาณของฟรีส แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่สามารถที่จะนำมาใช้ได้โดยตรงกับการตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วน เพราะสูตรการส่งผ่านของฟรีสมีการแสดงด้วยฟังก์ชันของความถี่ แต่การดิสซาร์จบางส่วนทำให้เกิดการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปแบบของสัญญาณอิมพัลส์ซึ่งเป็นสัญญาณในโดเมนเวลา ดังนั้นจึงต้องมีการประยุกต์ใช้สูตรการส่งผ่านของฟรีส โดยสูตรการส่งผ่านของฟรีสดังสมการที่ 3.1 และ 3.2 [25]

$$G_{\text{Friis}}(f) = \frac{P_r(f)}{P_t(f)} \tag{3.1}$$

$$= G_f(f, d) G_t(f, \Omega_t) G_r(f, \Omega_r)$$

$$H_{\text{Friis}}(f) = H_f(f, d) \mathbf{H}_r(f, d) \cdot \mathbf{H}_t(f, d) \tag{3.2}$$

- เมื่อ $P_t(f, d)$ คือ กำลังของสัญญาณส่ง
- $P_r(f, d)$ คือ กำลังของสัญญาณรับ
- $G_t(f)$ คือ อัตราขยายของสายอากาศส่ง
- $G_r(f)$ คือ อัตราขยายของสายอากาศรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-----------|--|
| $G_r(f)$ | คือ อัตราขยายในอวกาศว่าง |
| $H_r(f)$ | คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศรับ |
| $H_t(f)$ | คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศส่ง |
| $H_f(f)$ | คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนในอวกาศว่าง |
| λ | คือ ความยาวคลื่น |
| d | คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ |

แต่อย่างไรก็ตามในการตรวจหาและวินิจฉัยการดิสซาร์จบางส่วนด้วยวิธีทางแม่เหล็กไฟฟ้า ไม่สามารถนำสูตรการส่งผ่านของฟรีสมาใช้ได้โดยตรง เนื่องจากคุณลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากการเกิดการดิสซาร์จบางส่วนจะเป็นรูปแบบอิมพัลส์ ดังนั้นจะต้องมีการปรับสูตรการส่งผ่านของฟรีสเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำมากขึ้น โดยการปรับปรุงสูตรการส่งผ่านของฟรีสได้ถูกนำเสนอตั้งสมการที่ 3.3 [26] และแสดงแบบจำลองฟังก์ชันถ่ายโอนในหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วนโดยใช้วงจรกรองแบบแมตซ์ดังรูปที่ 3.2

$$H_{m\text{-Friis}}(f, d) = H_{\text{complex}}(f, d) H_{mf}(f) \mathbf{H}_r(f, d, \Omega_r) \cdot \mathbf{H}_t(f, d, \Omega_t) \quad (3.3)$$

เมื่อ $H_{\text{complex}}(f, d)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงซ้อน, $\mathbf{H}_r(f, d, \Omega_r)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนด้านรับและ $\mathbf{H}_t(f, d, \Omega_t)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนด้านส่งโดยฟังก์ชันถ่ายโอนในพื้นที่ว่างสามารถหาได้จากสมการที่ 3.4

$$H_{\text{complex}}(f, d) = \frac{\lambda}{4\pi d} \exp(-jkd) \quad (3.4)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ($k = 2\pi f/c$)
 c คือ ความเร็วในการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
 f คือ ความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

โดยสามารถหารูปคลื่นของสัญญาณที่รับ $v_r(t, d)$ ได้จากคอนโวลูชันของรูปคลื่นสัญญาณส่ง $v_t(t, d)$ และผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณ $h_{m\text{-Friis}}(t, d)$ ดังสมการที่ 3.5 และ 3.6

$$v_r(t, d) = v_t(t) \otimes h_{m\text{-Friis}}(t, d) \quad (3.5)$$

$$h_{m\text{-Friis}}(t, d) = \int_{-\infty}^{\infty} H_{m\text{-Friis}}(f, d) df \quad (3.6)$$

เมื่อ \otimes คือเครื่องหมายคอนโวลูชัน และสามารถหาความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้ $V_r(f, d)$ ได้จากสมการที่ 3.7

$$V_r(f, d) = V_t(f) H_{m\text{-Friis}}(f, d) \quad (3.7)$$

เมื่อ $V_t(f)$ คือ ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณส่ง

3.3.2 วงจรกรองแบบแมตซ์

จากฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณการแพร่กระจายย่านยูเอชเอฟของเครื่องรับสัญญาณจะนำเข้าสู่ตัวกรองที่ตรงกับ $H_{mf}(f)$ ถึงขยายอัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อการรบกวน (Signal to Noise Ratio: SNR) ให้สูงสุดดังสมการ 3.8 [26]

$$H_{mf}(f) = \frac{H_{m\text{-Friis}}^*(f)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_{m\text{-Friis}}^*|^2 df}} \quad (3.8)$$

ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขของกำลังสัญญาณรบกวนที่ส่งออกดังสมการ 3.9

$$\int_{-\infty}^{\infty} |H_{mf}(f)|^2 df = 1 \quad (3.9)$$

ในการยกตัวอย่างนี้ ฟังก์ชันถ่ายโอนและสเปกตรัมของช่องสัญญาณรูปคลื่นสัญญาณที่ได้รับคือ $H_{m\text{-Friis}}(f)$ และ $h_{m\text{-Friis}}(t)$ และ $E_i = 1$ เาต์พุตของรูปคลื่น โดยรูปคลื่นเอาต์พุตใช้ตัวกรองกับ $v_{m\text{-filter}}(t)$ ที่ตรงกันดังสมการ 3.10

$$v_{mf}(t) = \frac{h_{m\text{-Friis}}(t) \otimes h_{mf}(t)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} h_{m\text{-Friis}}^2(t) dt}}, \quad (3.10)$$

ในรูปคลื่นสัญญาณเอาต์พุตตัวกรองที่ตรงกับ $v_{m\text{-filter}}(t)$ ดังสมการ 3.11

$$V_{mf}(f) = H_{m\text{-Friis,Iso}}(f) H_{mf}(f) = \frac{|H_{m\text{-Friis}}(f)|^2}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_{m\text{-Friis}}(f)|^2 df}}, \quad (3.11)$$

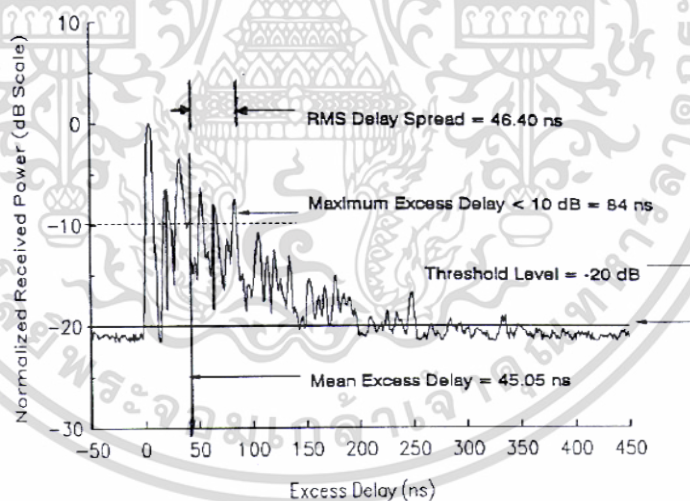
และอัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อการรบกวนสูงสุดดังสมการ 3.12
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \max_t v_{mf}(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} V_{mf}(f) df \\ &= \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_{m\text{-Friis}}(f)|^2 df} \end{aligned} \quad (3.12)$$

สมการที่ 3.12 คือสมการของฟรีสในเชิงซ้อนย่านความถี่สูงมาก ซึ่งรวมถึงคุณลักษณะของสายอากาศ การสูญเสียเชิงวิถีในพื้นที่ว่าง และรูปคลื่นสัญญาณที่เข้ามา เป็นที่ชัดเจนว่าการขยายสายอากาศในพื้นที่ว่างไม่สามารถอธิบายได้ในแง่ของอัตราขยายความถี่สูงมาก

3.3.3 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน

เป็นการแสดงให้เห็นถึงระดับกำลังงานของสัญญาณที่เข้ามายังด้านรับที่เวลาต่าง ๆ อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของสัญญาณที่มีการสะท้อนในหลายทิศทางหรือที่เรียกว่าสัญญาณหลายวิถี โดยจะเรียกว่า ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน (Power delay profile: PDP) ตัวอย่างของ PDP ได้แสดงดังรูปที่ 3.3 [27] โดยจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ ต่อเวลาที่เข้ามาถึง และนอกจากนั้นยังสามารถนำไปพิจารณาถึงผลการกระจายทางเวลา (Time dispersion) ประกอบด้วย การประวิงเข้าถึงเฉลี่ย (Mean excess delay) และ ค่าการแผ่ประวิง RMS (RMS delay spread)



รูปที่ 3.3 ภาพตัดข้างการประวิงกำลังงาน [27]

ที่กล่าวมาแล้วในข้างต้นว่าเส้นทางการส่งผ่านของสัญญาณระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับมีได้หลายทิศทาง และสัญญาณแต่ละส่วนมักจะส่งผ่านในเส้นทางที่มีระยะทางไม่เท่ากัน สัญญาณบางส่วนอาจจะเดินทางในระดับเส้นสายตาระหว่างด้านส่งและด้านรับ สัญญาณส่วนนี้มักจะเดินทางถึงด้านรับได้เร็ว ในขณะที่สัญญาณส่วนอื่นที่มีการตกกระทบพื้นผิวของวัสดุและเกิดการสะท้อนหลายครั้งกว่าจะเดินทางถึงด้านรับ สัญญาณมักจะใช้เวลาการแพร่กระจายที่ยาวนานกว่า ความล่าช้าในการเดินทางของสัญญาณแต่ละส่วนก่อให้เกิดปัญหาที่เรียกว่า การแผ่ประวิง (Delay spread) ขึ้น นั่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือสัญญาณแต่ละส่วนใช้เวลาเดินทางถึงจุดหมายไม่เท่ากัน หากจะพิจารณาถึงเวลาที่ถูกระวังออกไปของสัญญาณที่เข้ามายังด้านรับ ในส่วนของการกระจายทางเวลา (Time dispersion) นั้นสามารถที่จะวิเคราะห์โดยใช้พารามิเตอร์ที่เรียกว่า ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ประวิงเกินออกไปจากค่าเวลาเดิมหรือการประวิงเข้าถึงเฉลี่ย (Mean excess delay; $\bar{\tau}$) และค่าการแผ่ประวิง RMS (RMS delay spread; σ_τ) ซึ่งค่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 ตัวนี้ถูกนิยามไว้ดังสมการที่ 3.13 และสมการที่ 3.15 ตามลำดับ

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i^2 \tau_i}{\sum_{i=1}^n a_i^2} = \frac{\sum_{i=1}^n P(\tau_i) \tau_i}{\sum_{i=1}^n P(\tau_i)} \quad (3.13)$$

โดยที่

- $\bar{\tau}$ คือ การประวิงเข้าถึงเฉลี่ย
- a_i คือ ระดับของสัญญาณเส้นทางที่ i
- τ_i คือ เวลาประวิงที่เกิดขึ้นของสัญญาณเส้นทางที่ i
- $P(\tau_i)$ คือ ระดับกำลังงานของสัญญาณเส้นทางที่ i

สำหรับค่าการแผ่ประวิง RMS นั้นจะมีนิยามคือ

$$\sigma_\tau = \sqrt{\tau^2 - (\bar{\tau})^2} \quad (3.14)$$

โดยที่

$$\tau^2 = \frac{\sum_{i=1}^n a_i^2 \tau_i^2}{\sum_{i=1}^n a_i^2} = \frac{\sum_{i=1}^n P(\tau_i) \tau_i^2}{\sum_{i=1}^n P(\tau_i)} \quad (3.15)$$

3.3.4 การสูญเสียเชิงวิถี

การสูญเสียเชิงวิถี (Path loss) เป็นการลดทอนของสัญญาณที่แปรตามระยะทางระหว่างด้านส่งและด้านรับโดยที่ค่าเฉลี่ยกำลังของสัญญาณจะลดลงตามค่า d^{-n} โดย d คือ ระยะทางระหว่างด้านส่งและด้านรับ ส่วน n เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งมีขนาดแตกต่างกันไปตามสภาพของบริเวณที่สัญญาณส่งผ่าน [27] โดยค่าการสูญเสียเชิงวิถีนั้นอาจเกิดขึ้นเนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ

ในระบบสื่อสารไร้สาย สัญญาณที่กำเนิดขึ้นจากด้านส่งที่จะต้องนำไปป้อนเข้าสายอากาศเพื่อแปลงสัญญาณไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) สำหรับแพร่กระจายผ่านช่องสัญญาณซึ่งโดยทั่วไปก็คืออากาศ เมื่อสัญญาณเดินทางมาถึงด้านรับก็จะมีสายอากาศรับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณซึ่งทำหน้าที่กลับกันจากด้านส่ง คือทำการแปลงสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากลับไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าอีกครั้ง ในการส่งคลื่นสัญญาณผ่านอวกาศว่างนั้น มักจะนิยามให้ค่าการสูญเสียเชิงวิถีในอวกาศว่าง (Free space path loss) มีค่าเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังงานของสัญญาณที่ถูกส่งต่อกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ โดยทั่วไปมักจะแสดงให้อยู่ในหน่วยของเดซิเบล (Decibel) ดังแสดงในสมการที่ 3.16

$$PL = \frac{P_t}{P_r} \quad (3.16)$$

เมื่อ

P_t คือ ระดับสัญญาณที่ใช้ส่ง

P_r คือ ระดับสัญญาณที่รับได้

โดยในการวิเคราะห์ค่าสูญเสียเชิงวิถีในระบบการตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วน PL_{pd} นั้นจะพิจารณาที่กำลังงานสูงสุดของสัญญาณที่ใช้ส่งและกำลังสูงสุดของสัญญาณที่รับได้ซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะทาง (d) โดยมีนิยามเป็นไปตามสมการที่ 3.17 [30]

$$PL_{pd}(d)[dB] = -20 \log \left[\max |v_r(t, d)| \right] \quad (3.17)$$

3.4 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงหลักการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าบนพื้นฐานสูตรการส่งผ่านของฟรีส ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับช่องสัญญาณ บนพื้นฐานสูตรการส่งผ่านของฟรีส (โดยการประยุกต์สูตรของฟรีสในโดเมนเวลา) และนอกจากนี้ยังได้พิจารณานำเสนอเครื่องรับแบบแมตซ์เพื่อให้เหมาะสมที่สุดและได้ค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าสูงมากที่สุดและวงจรกรองแบบแมตซ์ ผลการทดลองวิจัยและผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีและภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ อันเนื่องมาจากผลกระทบภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ผลกระทบในหม้อแปลงไฟฟ้าได้ทำการจำลองการวัดจริง อุปกรณ์และขั้นตอนการวัดได้แสดงไว้ในบทที่ 4

บทที่ 4

การทดลองวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการ ตรวจหาการดิสชาร์จบางส่วน

4.1 กล่าวนำ

จากการศึกษาวิธีการและกระบวนการวิเคราะห์การเกิดดิสชาร์จบางส่วนในบทที่ 2 และบทที่ 3 ได้กล่าวถึงวิธีการที่เหมาะสมในการวิเคราะห์และประเมินผลของสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้า และในบทนี้ได้อธิบายถึงขั้นตอนการทดลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้า แบบจำลองการทดลองที่ใช้ เครื่องมือและอุปกรณ์ และแบบจำลองสัญญาณส่งที่ใช้ในการทดลอง ทำให้สามารถเข้าใจถึงกระบวนการทดลองวิจัยที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผลการทดลองที่ได้จากการทดลองวัดจะวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองที่ได้นำเสนอในบทก่อนหน้า โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

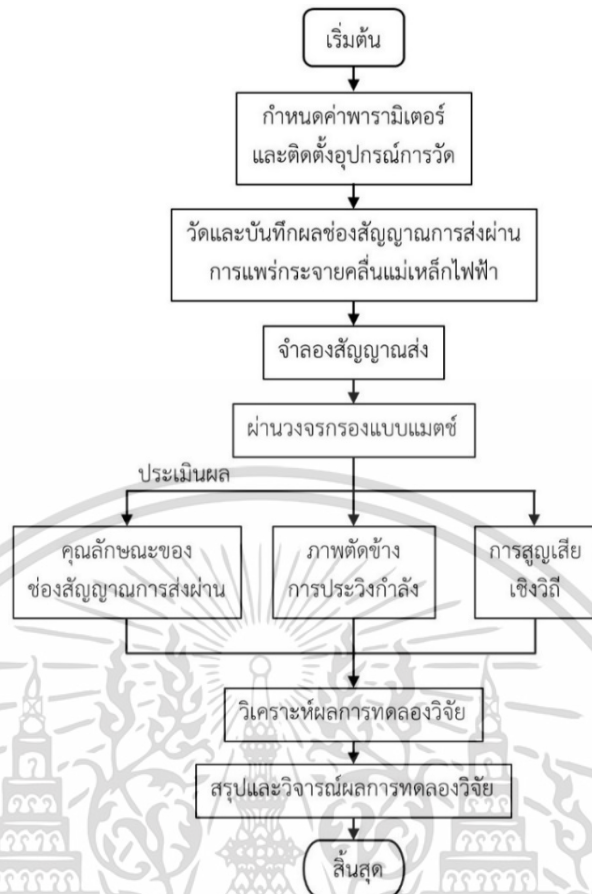
การศึกษาวิจัยการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถแบ่งขั้นตอนการศึกษาวิจัยออกเป็นขั้นตอนเพื่อให้การศึกษาวิจัยเป็นไปอย่างมีระเบียบแบบแผน ดังที่แสดงในรูปที่ 4.1 โดยขั้นตอนการศึกษาวิจัยที่ได้นำเสนอจะสอดคล้องกันกับแบบแผนการประเมินผลการทดลองที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 ขั้นตอนการศึกษาวิจัยจะครอบคลุมการกำหนดค่าพารามิเตอร์ การติดตั้งอุปกรณ์การวัดสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การวัดและบันทึกผลการส่งผ่านช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การจำลองสัญญาณส่งและการประเมินผลการทดลองวิจัย การวิเคราะห์ผลการทดลองวิจัย และสุดท้ายการสรุปผลการทดลองวิจัยโดยการประเมินผลเปรียบเทียบระหว่างกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและกรณีมีสิ่งกีดขวาง

4.3 แบบจำลองการทดลอง

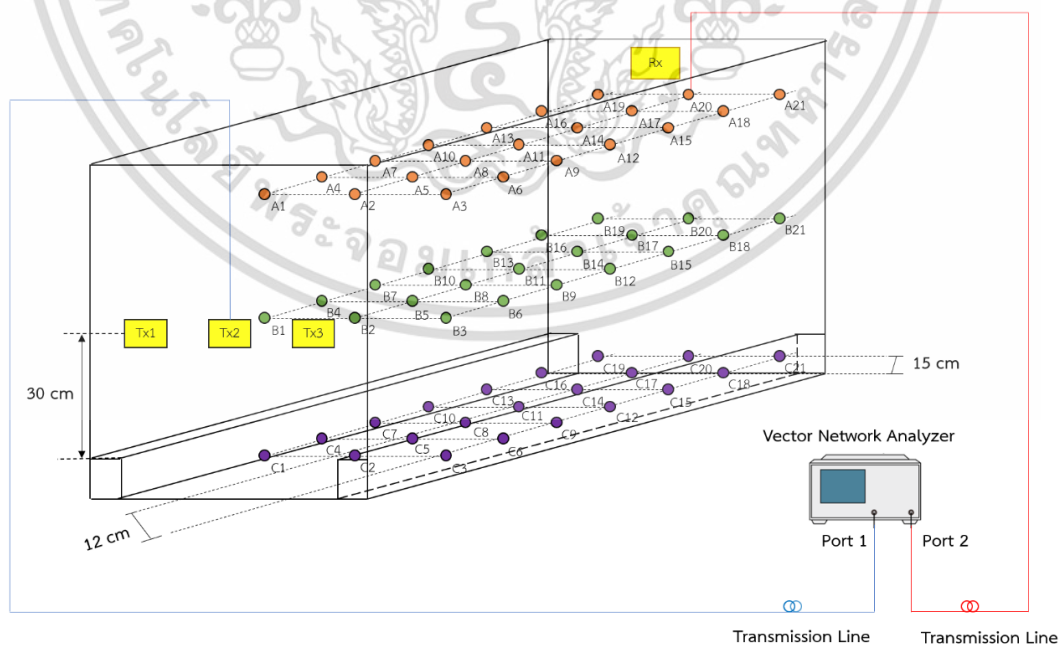
4.3.1 แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

แบบจำลองการวัดที่ใช้ทดสอบฟังก์ชันถ่ายโอนของสายอากาศในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 มิติกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง โดยวิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนของสายอากาศในหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพและคุณลักษณะของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปทั้งด้านรับและด้านส่ง โดยยึดสายอากาศด้านส่งติดกับผนังหม้อแปลงไฟฟ้าดังรูปที่ 4.2 ทำการเปลี่ยนตำแหน่งเมื่อด้านส่ง 1 ตัว ส่งให้ด้านรับครบทั้ง 3 ระดับ โดยเริ่มจากระดับ A และสิ้นสุดที่ระดับ C จึงทำการเปลี่ยนตำแหน่งด้านส่งซึ่งสายอากาศด้านส่งสัญญาณคือ Tx สายอากาศด้านรับสัญญาณคือ Rx

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แผนภาพบล็อกของขั้นตอนการศึกษาวิจัยการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้า

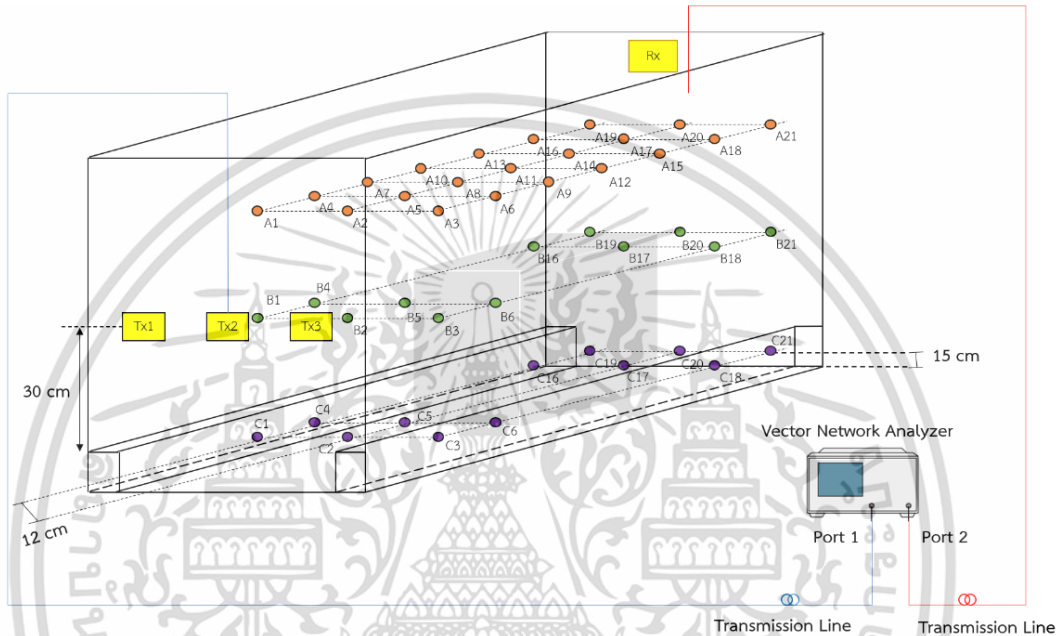


รูปที่ 4.2 แบบจำลอง 3 มิติ ในการทดลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

แบบ 3 ระดับ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากรณีมีสิ่งกีดขวาง

แบบจำลองการวัดที่ใช้ในการทดสอบฟังก์ชันถ่ายโอนของสายอากาศในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 มิติ กรณีมีสิ่งกีดขวาง วิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนของสายอากาศในหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีแกนหม้อแปลงไฟฟ้าคือสิ่งกีดขวาง ใช้สายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปติดตั้งทั้งด้านรับและด้านส่ง โดยยึดสายอากาศด้านส่งติดกับผนังหม้อแปลงไฟฟ้าดังรูปที่ 4.3 และเปลี่ยนตำแหน่งเมื่อด้านส่ง 1 ตัว ส่งให้ด้านรับครบทั้ง 3 ระดับ โดยเริ่มจากระดับ A และสิ้นสุดที่ระดับ C จึงทำการเปลี่ยนตำแหน่งด้านส่ง



รูปที่ 4.3 แบบจำลอง 3 มิติ ในการทดลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 ระดับ กรณีมีสิ่งกีดขวาง

4.3.3 ขั้นตอนการทดลองวัด

ขั้นตอนการทดลองวัดตามแบบจำลองทั้งสองกรณีสามารถแบ่งได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้ และได้แสดงขั้นตอนการเปรียบเทียบและการทดลองตามรูปที่ 4.4 และ 4.5

1. จัดเตรียมอุปกรณ์การทดลองตามรูปที่ 4.2 และ 4.3 และเปิดเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ จากนั้นตั้งค่าพารามิเตอร์การทดลองดังตารางที่ 4.1
2. เชื่อมต่อสายนำสัญญาณและขั้วต่อเข้ากับชุดอุปกรณ์จับยึดสายอากาศ
3. ปรับเทียบสายนำสัญญาณและขั้วต่อโดยใช้ชุดอุปกรณ์ปรับเทียบ และคำนวณอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ให้มีค่าไม่น้อยกว่า 20 dB หากมีค่าน้อยกว่า 20 dB ต้องทำการปรับเทียบสายนำสัญญาณใหม่จนกว่าค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าไม่น้อยกว่า 20 dB

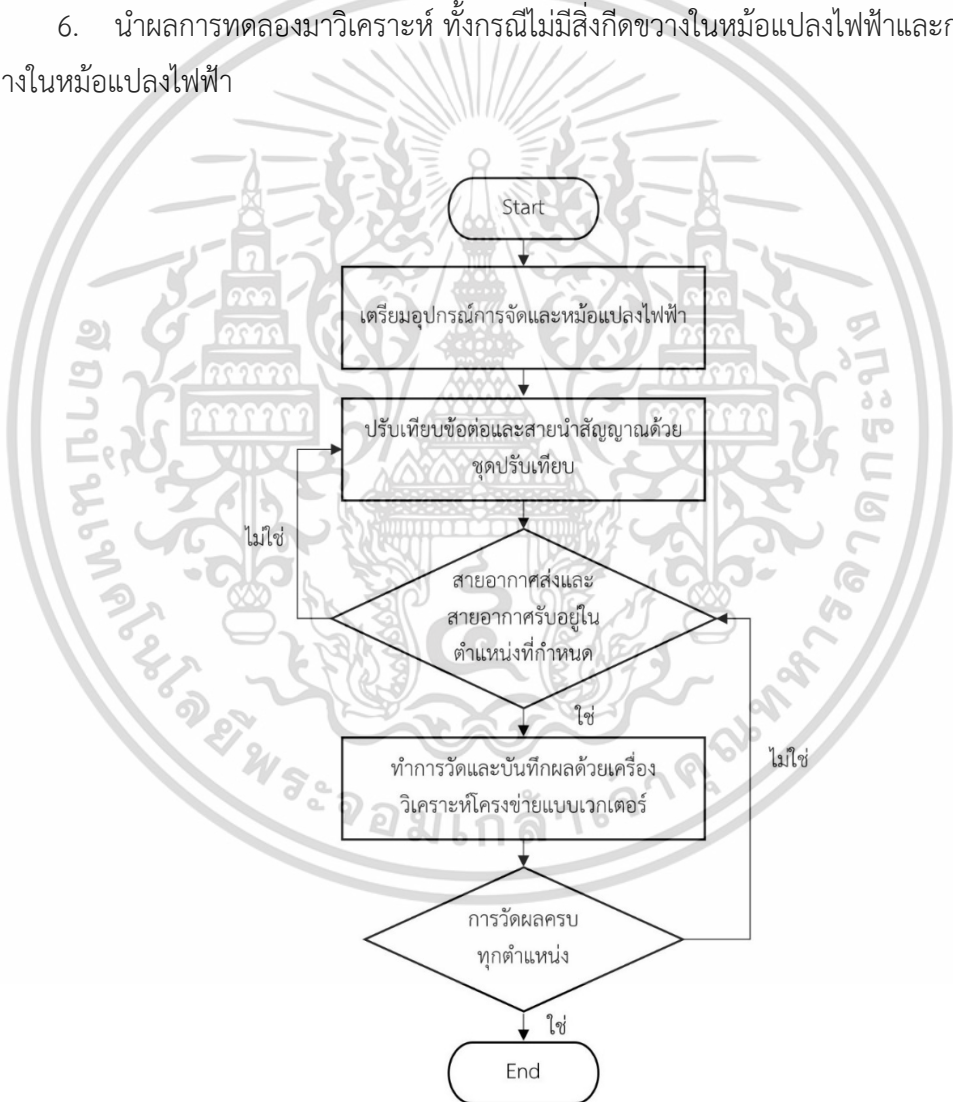
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เชื่อมต่อสายอากาศ โดยติดตั้งสายอากาศด้านส่งที่ตำแหน่ง Tx1 และติดตั้งสายอากาศด้านรับที่ตำแหน่ง A1 บันทึกค่าฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณ เลื่อนตำแหน่งสายอากาศด้านรับไปยังตำแหน่งถัดไปดังรูปที่ 6 โดยที่ สายอากาศด้านส่งต้องส่งสัญญาณครบทั้ง 3 ระดับ เริ่มจากระดับ A ไป B และสุดท้าย C ทำซ้ำจนครบทุกตำแหน่งของตำแหน่งสายอากาศด้านรับตามที่กำหนด

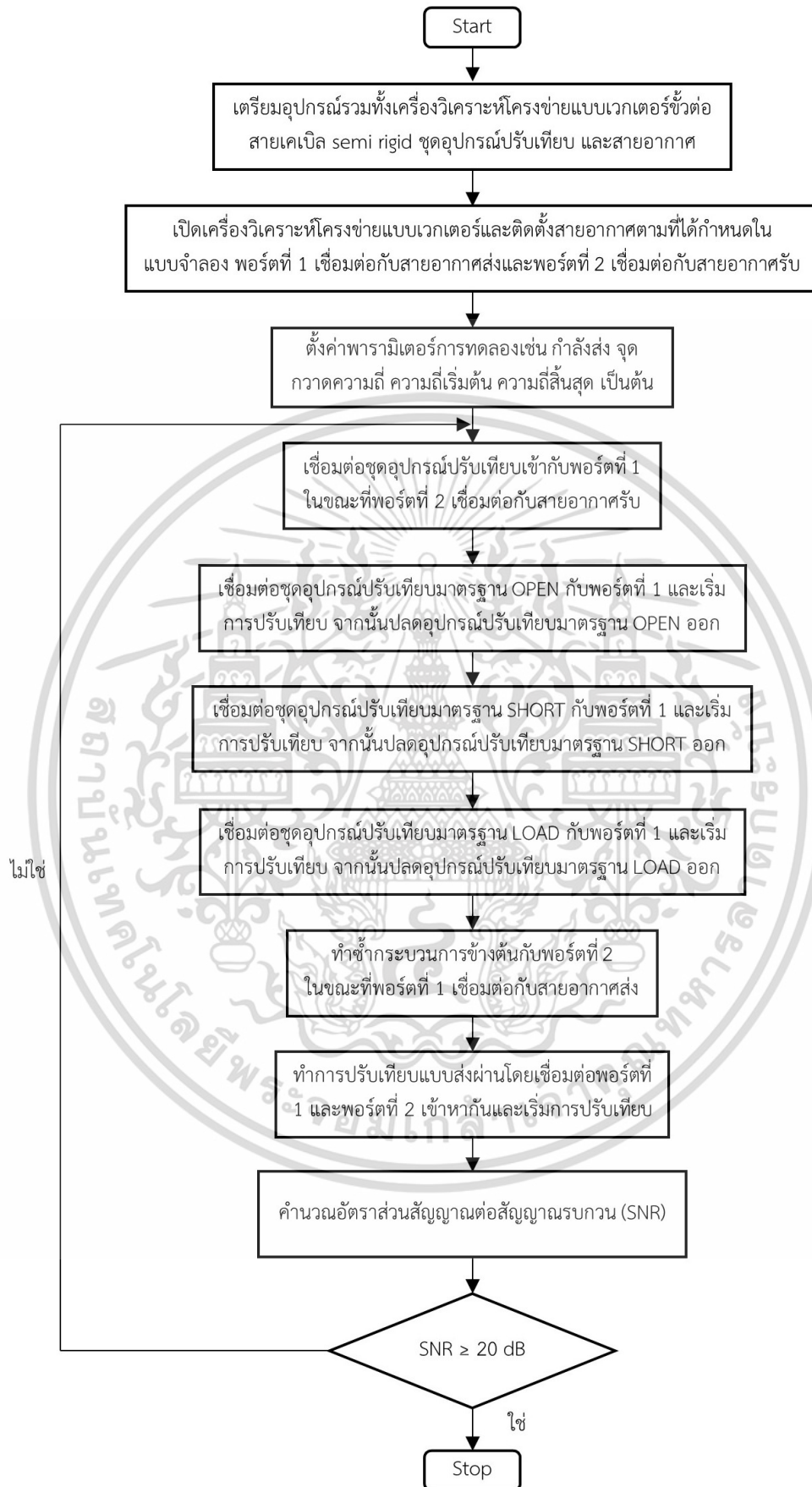
เลื่อนตำแหน่งสายอากาศด้านส่งไปยังตำแหน่งถัดไป และทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 4 จนครบทุกตำแหน่งของตำแหน่งสายอากาศด้านส่งและสายอากาศด้านรับตามที่กำหนด ทำการบันทึกผลในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

5. นำแกนหม้อแปลงไฟฟ้าติดตั้งลงในหม้อแปลง เพื่อทำการทดลองในกรณีมีสิ่งกีดขวาง และหลังจากนั้นทำการทดลองซ้ำตามขั้นตอนที่ 4 และ ขั้นตอนที่ 5 ตามลำดับ

6. นำผลการทดลองมาวิเคราะห์ ทั้งกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางในหม้อแปลงไฟฟ้าและกรณีมีสิ่งกีดขวางในหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 4.4 แผนภาพบล็อกของขั้นตอนการทดลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 4.5 แผนภาพบล็อกของขั้นตอนการปรับเทียบ

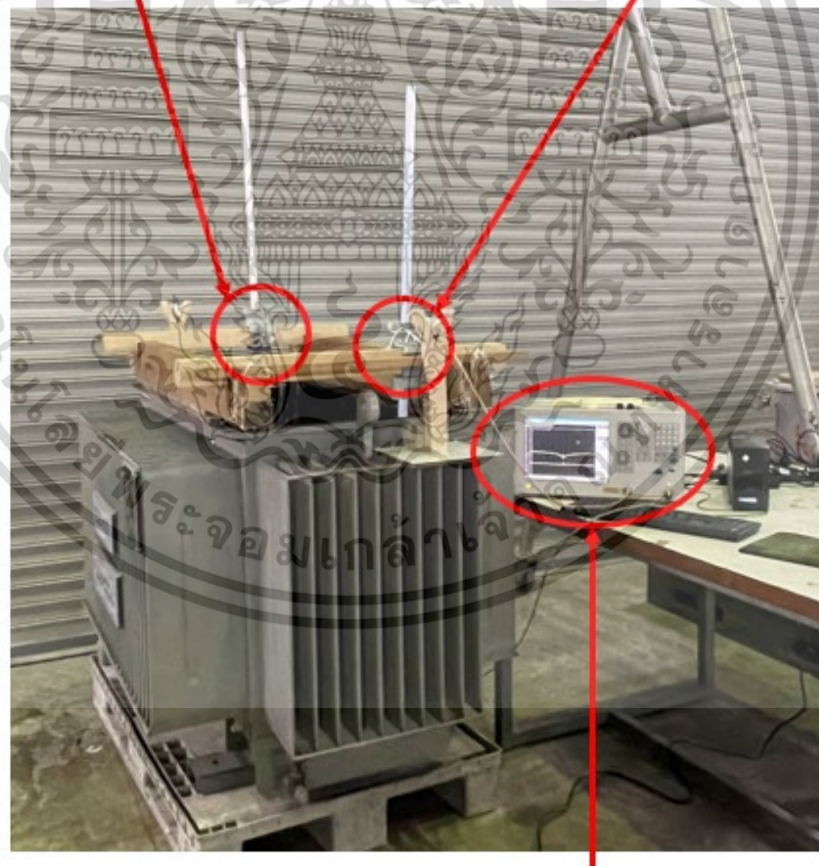
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ในการทดลองวัดการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้า

| พารามิเตอร์ | ค่า |
|-------------------------------|--|
| ความถี่ที่ทดลอง | 2.3 จิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.5 จิกะเฮิรตซ์ |
| จำนวนจุดกวาด (Sweeping point) | 801 จุด |
| กำลังส่ง | -20 dBm |
| ชนิดของสายอากาศ | สายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป |
| รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น | ทิศทางเดียว |
| ทิศทางการโพลาไรซ์ | แนวตั้ง |
| หม้อแปลงไฟฟ้า | 630 KVA 50 cm × 105 cm × 90 cm (W × L × H) |

สายอากาศแผ่นไมโครสตริปฝั่งรับ

สายอากาศแผ่นไมโครสตริปฝั่งส่ง



เครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่ายแบบเวกเตอร์

รูปที่ 4.6 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดลองการวัดสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 มิติ

กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง

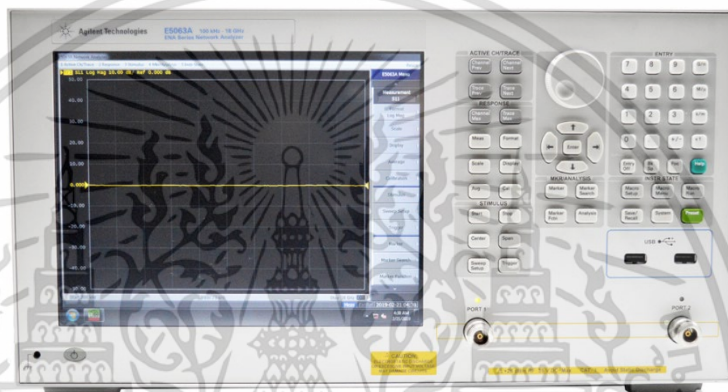
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

4.4.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์

การวัดฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณจะใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 4.8 โดยประกอบด้วย จอแสดงผล (Monitor) ชุดทดสอบพารามิเตอร์การกระจาย (S-Parameter Test Set) อุปกรณ์ชนิดนี้จะมีคุณสมบัติที่สามารถตรวจวัดสัญญาณในโครงข่ายหนึ่งพอร์ตและสองพอร์ต ซึ่งในการทดลองนี้จะทำการตรวจวัดแบบสองพอร์ตโดยพอร์ตที่หนึ่งคือพอร์ตที่ใช้ในการส่งสัญญาณ ส่วนพอร์ตสองจะใช้ในการรับสัญญาณ โดยที่ปลายของพอร์ตทั้งสองจะถูกต่อด้วยสายอากาศ



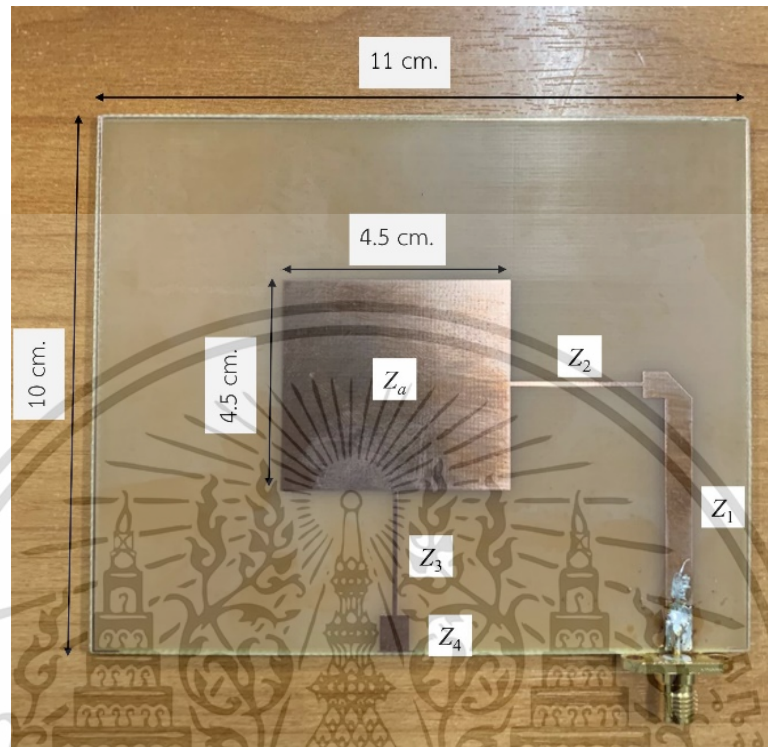
รูปที่ 4.8 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ ยี่ห้อ Agilent รุ่น E5061B [30]

4.4.2 สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริบ

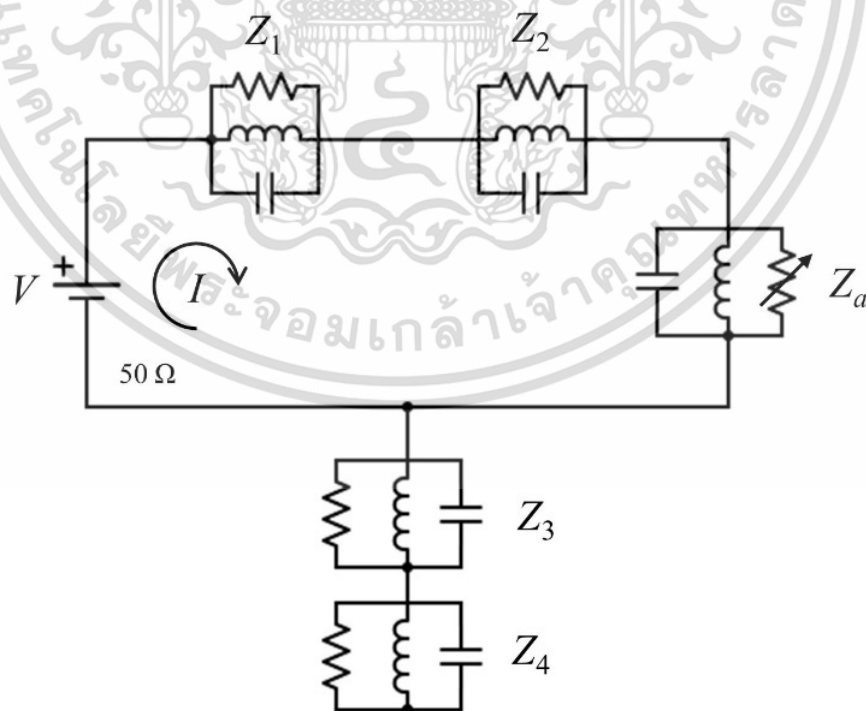
สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริบ (Microstrip patch antenna) ทั้งด้านส่งและรับ คุณสมบัติของสายอากาศเป็นสายอากาศที่ตอบสนองความถี่ได้กว้างสามารถรองรับการใช้งานในย่านความถี่ 2.4 จิกะเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดย่านความถี่การใช้งานของการตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วน ข้อดีของสายอากาศชนิดนี้คือ มีขนาดของสายอากาศเล็ก น้ำหนักเบา สร้างได้ง่ายเฟสมีความเป็นเชิงเส้นตลอดช่วงความถี่ [28] และ [29] รูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงให้เห็นถึงลักษณะโครงสร้างของสายอากาศ และวงจรสมมูล ของสายอากาศตามลำดับ สายอากาศที่สร้างขึ้นสามารถเปรียบเทียบสายอากาศที่เหมาะสมได้จากการฟังก์ชันถ่ายโอนของสายอากาศสามารถวัดได้ด้วยวิธีสามสายอากาศ (Three antenna method) [31] และ [32] ดังรูปที่ 4.11 โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ สามารถวัดฟังก์ชันถ่ายโอนที่ซับซ้อนได้ อย่างไรก็ตามฟังก์ชันถ่ายโอนนี้เป็นผลลัพธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนของสายอากาศด้านส่งและด้านรับในพื้นที่อากาศว่าง

ฟังก์ชันถ่ายโอนพื้นที่ว่างคำนวณจากระยะทางระหว่างสายอากาศ เพื่อทราบฟังก์ชันถ่ายโอนของสายอากาศที่กำลังทดสอบ (Antenna Under Test: AUT) ด้านสายอากาศด้านรับจะต้องทราบ

ล่วงหน้าว่าฟังก์ชันถ่ายโอนของสายอากาศด้านส่งซึ่งมักจะเป็นสายอากาศมาตรฐาน เป็นข้อมูลการเปรียบเทียบการวัดโดยรวมสรุปได้ดังนี้

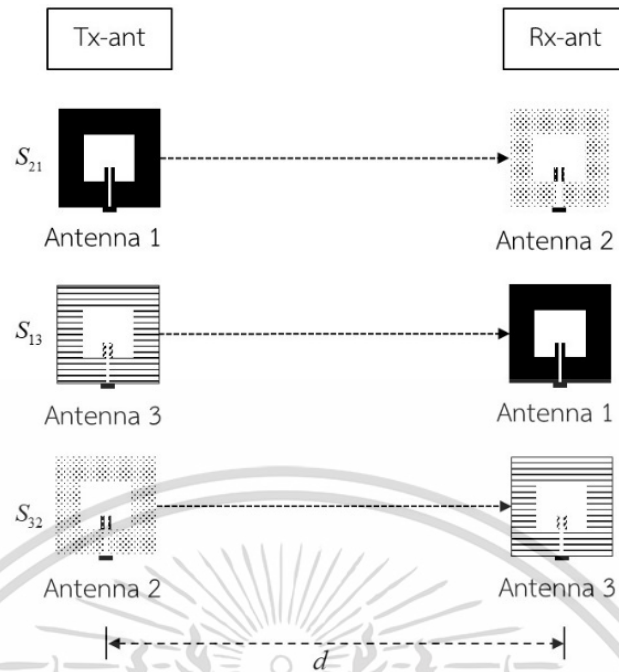


รูปที่ 4.9 ขนาดและโครงสร้างของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป



รูปที่ 4.10 วงจรสมมูลของสายอากาศไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แบบจำลองวิธีสามสายอากาศ [32]

ขั้นตอนที่ 1 การคำนวณมาตรฐานของสายอากาศ ตามมาตรฐานการปรับการปรับเทียบวิธีสามสายอากาศ ได้ถูกเสนอขึ้นเพื่อการวัดปัจจัยสายอากาศที่ซับซ้อน ด้วยวิธีการนี้ ต้องใช้สายอากาศแบบขั้วเชิงเส้น 3 อัน แต่ไม่จำเป็นต้องเหมือนกัน การวัด 3 ครั้งจะดำเนินการโดยใช้ชุดการทดสอบทั้งหมดของสายอากาศทั้ง 3 อันซึ่งไปยังทิศทางเดียวกันกับที่แสดงในรูปที่ 4.11 ผลลัพธ์คือชุดของสมการ 3 สมการพร้อมกันดังสมการ

$$S_{21}(f) = H_1(f)H_f(f,d)H_2(f) \quad (4.1)$$

$$S_{13}(f) = H_3(f)H_f(f,d)H_1(f) \quad (4.2)$$

$$S_{32}(f) = H_2(f)H_f(f,d)H_3(f) \quad (4.3)$$

โดย $H_i(f)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนความถี่เชิงซ้อนของสายอากาศ i S_{ji} คือ ผลการวัดโดยการใช้สายอากาศด้านส่ง i และสายอากาศด้านรับ j d คือ ระยะทางระหว่างสายอากาศ และ $H_f(f,d)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงซ้อนของพื้นที่อากาศว่าง จากนั้นเราสามารถประเมินฟังก์ชันถ่ายโอนความถี่เชิงซ้อนของสายอากาศ โดยใช้สมการดังนี้

$$H_1(f) = \sqrt{\frac{S_{21}(f)S_{32}(f)}{S_{13}(f)H_f(f,d)}} \quad (4.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_2(f) = \sqrt{\frac{S_{21}(f)S_{13}(f)}{S_{32}(f)H_f(f,d)}} \quad (4.5)$$

$$H_3(f) = \sqrt{\frac{S_{32}(f)S_{13}(f)}{S_{21}(f)H_f(f,d)}} \quad (4.6)$$

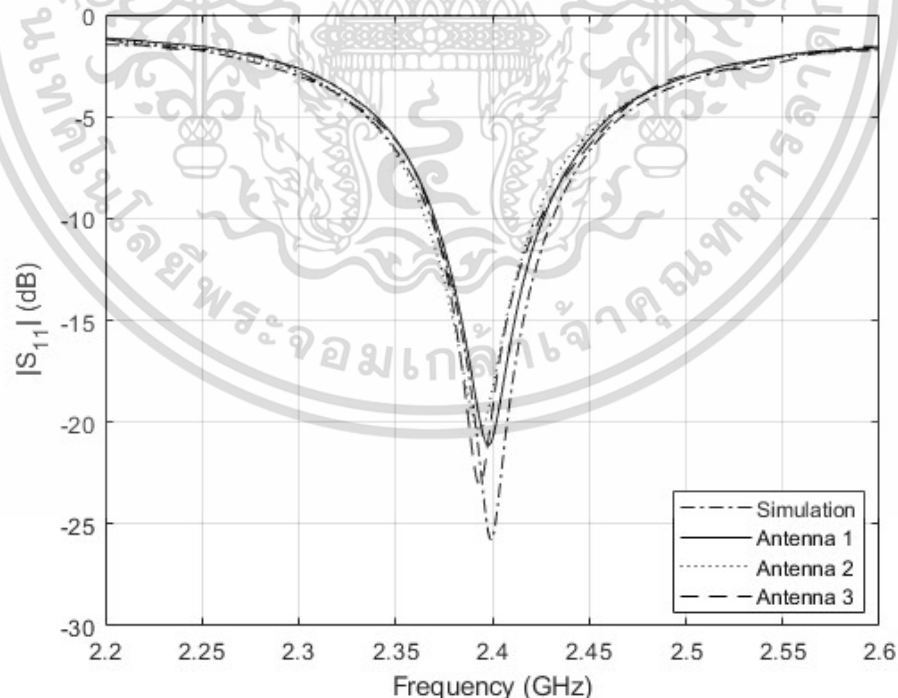
ขั้นตอนที่ 2 วัดฟังก์ชันถ่ายโอนของสายอากาศที่กำลังทดสอบ ด้วยการใช้สายอากาศมาตรฐานและสายอากาศที่กำลังทดสอบเป็นสายอากาศด้านส่งและสายอากาศด้านรับ ตามลำดับ ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างพอร์ตสายอากาศด้านส่งและสายอากาศด้านรับแสดงดังสมการที่ (4.7)

$$S_{21}(f) = H_{\text{AUT}}(\theta, \varphi, f)H_f(f,d)H_{\text{Std}}(f) \quad (4.7)$$

และฟังก์ชันถ่ายโอนของสายอากาศที่กำลังทดสอบได้ดังสมการที่ (4.8)

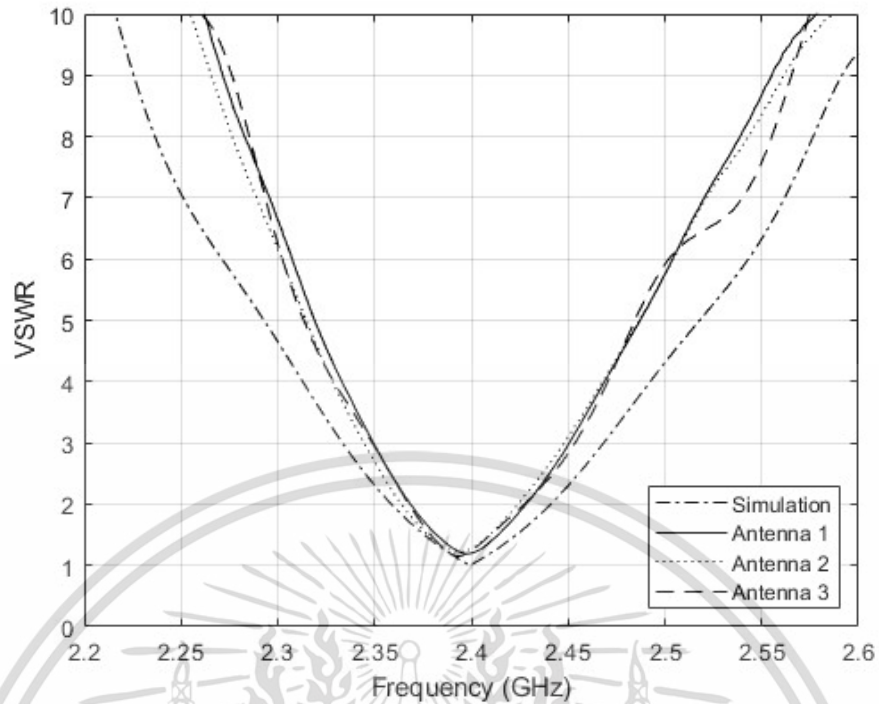
$$H_{\text{AUT}}(\theta, \varphi, f) = \frac{S_{21}(f)}{H_f(f,d)H_{\text{Std}}(f)} \quad (4.8)$$

รูปที่ 4.12 ถึง 4.16 แสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะของสายอากาศ ซึ่งเป็นการแสดงผลเปรียบเทียบระหว่างสายอากาศที่สร้างขึ้นทั้ง 3 อันและผลจากการคำนวณ

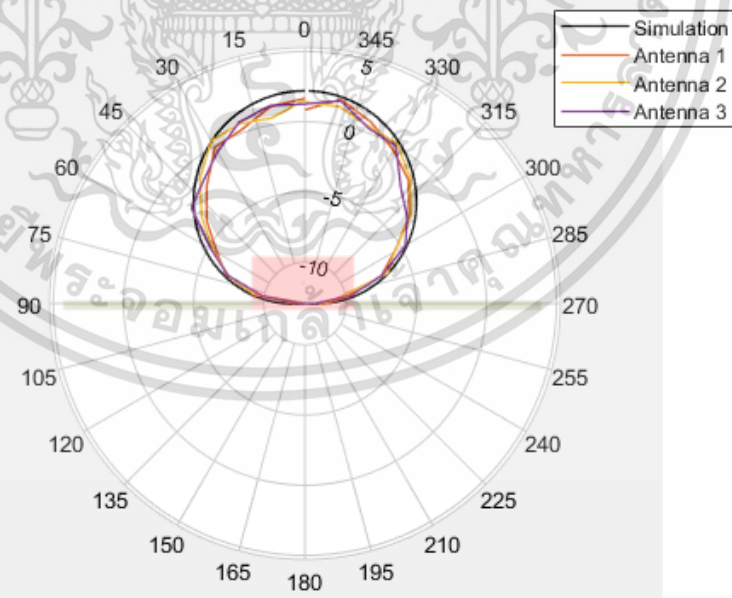


รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การสะท้อน $|S_{11}|$ ของสายอากาศแผ่นไมโครสตริประหว่างการจำลองและการทดสอบวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแผ่นไมโครสตริประหว่างการจำลองและการทดสอบวัด

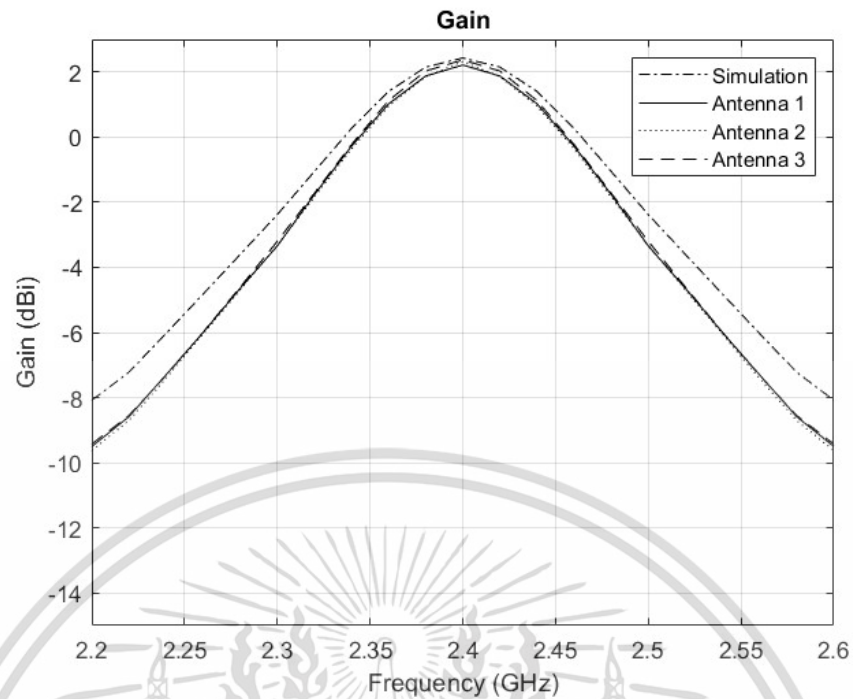


รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแผ่นไมโครสตริปในระนาบ

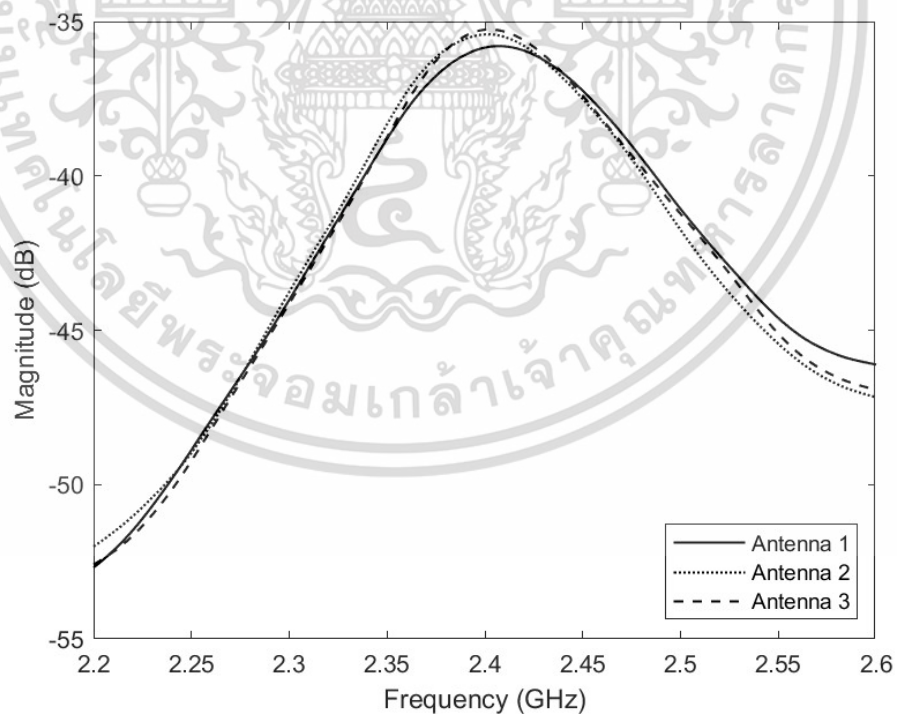
สนามไฟฟ้าระหว่างการจำลองและการทดสอบวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

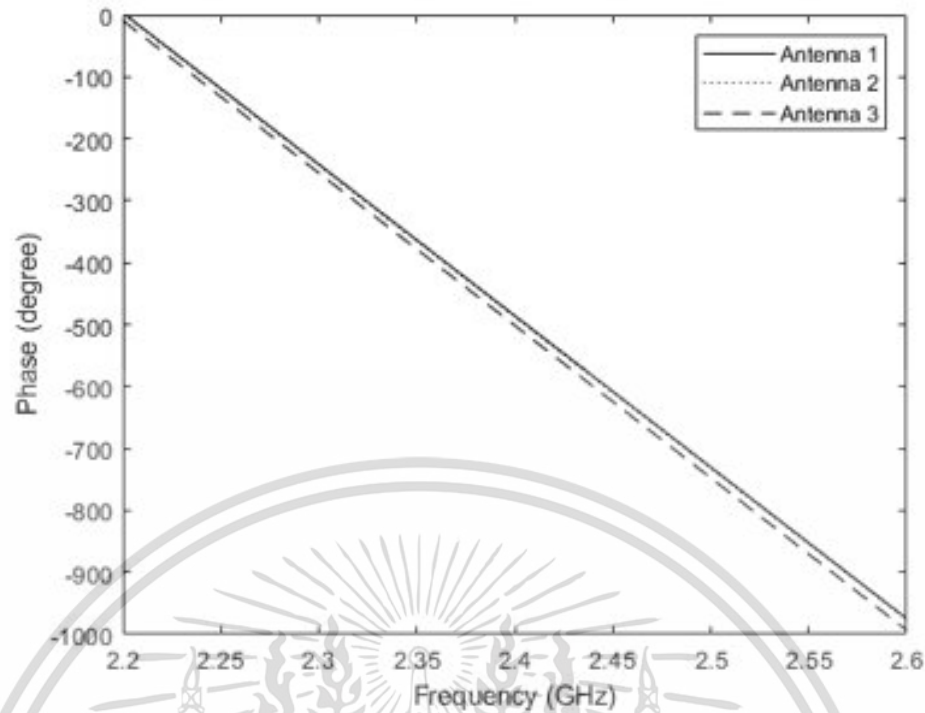


รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบอัตราขยายของสายอากาศแผ่นไมโครสตริประหว่างการจำลองและการทดสอบวัด



(ก) ขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) เฟส

รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณของสายอากาศระหว่างการจำลองและการทดสอบวัด

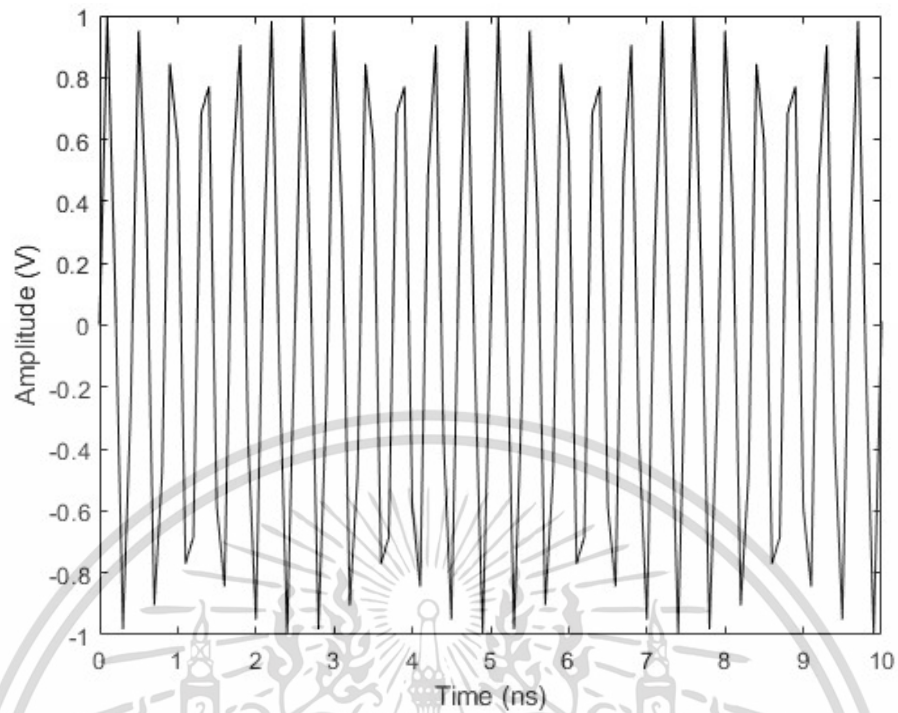
จากผลการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การสะท้อน $|S_{11}|$ ของสายอากาศจะเห็นว่าสายอากาศที่สร้างขึ้นมีความถี่ที่ใช้งานได้อยู่ระหว่าง 2.38 จิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.43 จิกะเฮิรตซ์และมีผลสอดคล้องกันกับอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน ในส่วนของแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศมีลักษณะเป็นแบบทิศทางเดียว และเมื่อทำการเปรียบเทียบฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณการส่งผ่านของสายอากาศที่สร้างขึ้นดังที่แสดงในรูปที่ 4.16 พบว่าขนาดและเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนมีขนาดใกล้เคียงกัน โดยสายอากาศอันที่ 3 เป็นสายอากาศที่มีขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนสูงสุดจึงได้เลือกสายอากาศอันที่ 3 เป็นสายอากาศส่ง จะสังเกตได้ว่าสายอากาศที่สร้างขึ้นสามารถนำมาใช้งานได้โดยมีความถี่และแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้

4.5 แบบจำลองสัญญาณที่ใช้ในการทดลอง

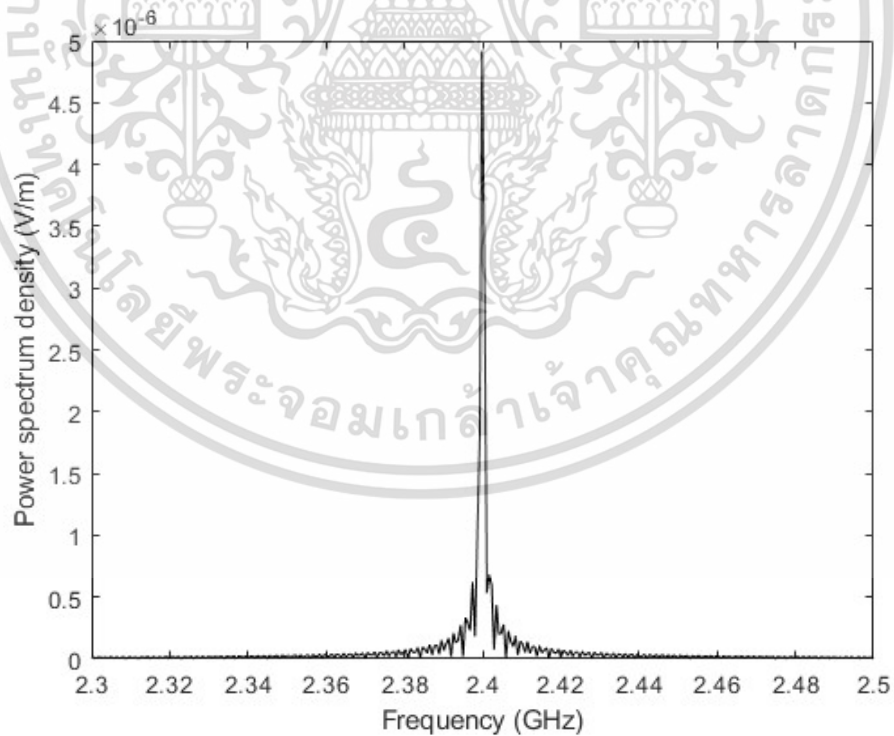
ระบบการส่งผ่านของสัญญาณใช้ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาใช้สัญญาณรูปคลื่นไซน์เป็นสัญญาณส่งเพื่อใช้ในการวิเคราะห์รูปแบบเชิงซ้อนของสัญญาณภายในหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อพิจารณาถึงคุณลักษณะของสัญญาณที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้าโดยมีแบบจำลองการวิเคราะห์ดังที่แสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งสัญญาณไซน์เป็นที่ใช้อย่างแพร่หลายในระบบการส่งผ่านของสัญญาณของการสื่อสารไร้สายทั่วไปดังรูปที่ 4.17 โดยรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของสัญญาณส่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4.9

$$v(t) = p(t) \cos(2\pi ft + \phi) \quad (4.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 สัญญาณส่ง



รูปที่ 4.18 ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของสัญญาณส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $v_i(t)$ คือสัญญาณส่ง $p(t)$ คือขนาดของสัญญาณส่ง f คือความถี่ของสัญญาณ และ φ คือเฟสของสัญญาณและสามารถหาสเปกตรัมของสัญญาณส่ง $V_i(f)$ ดังรูปที่ 4.18 ได้จากการ FFT ของสัญญาณส่งดังสมการที่ 4.10

$$V_i(f) = \int_{-\infty}^{\infty} p(t) \cos(2\pi ft + \varphi) e^{-j2\pi ft} dt \quad (4.10)$$

4.6 สรุป

บทนี้ได้อธิบายถึงขั้นตอนการศึกษาวิจัยการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบจำลองการทดลองวัดจริงด้วยพารามิเตอร์ที่ใช้งานการทดลองตามที่ได้กำหนด เครื่องมือและอุปกรณ์ นำเสนอสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทดลองวิจัยสำหรับใช้ในด้านส่งและด้านรับ นำเสนอแบบจำลองสามสายอากาศเพื่อปรับเทียบสายอากาศเพื่อหาสายอากาศที่มีประสิทธิภาพในการส่งผ่านดีที่สุดเป็นสายอากาศด้านส่ง และแบบจำลองสัญญาณส่งที่ใช้ในการทดลองเพื่อใช้ในการทดลองวิจัยตามแบบจำลองที่ได้นำเสนอในบทนี้ โดยนำผลการทดลองวิจัยไปวิเคราะห์และประเมินผลเปรียบเทียบระหว่างกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและกรณีมีสิ่งกีดขวางในบทที่ 5

บทที่ 5

ผลการทดลองวิจัย

5.1 กล่าวนำ

จากการทดลองวิจัยตามแบบจำลองการทดลองที่ได้นำเสนอในบทที่ 4 เพื่อเปรียบเทียบการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างกรณีที่ไม่มีการกีดขวางและกรณีที่มีการกีดขวาง จากนั้นนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ตามแบบแผนการประเมินผลที่นำเสนอในบทที่ 3 บทนี้ได้กล่าวถึงผลการทดลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยผลการทดลองวิจัยจะแบ่งออกเป็นทั้งหมด 3 พารามิเตอร์ดังนี้ ขนาดและเฟสฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณ ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ และการสูญเสียเชิงวิถี

5.2 คุณลักษณะของสัญญาณการส่งผ่านของฟังก์ชันถ่ายโอน

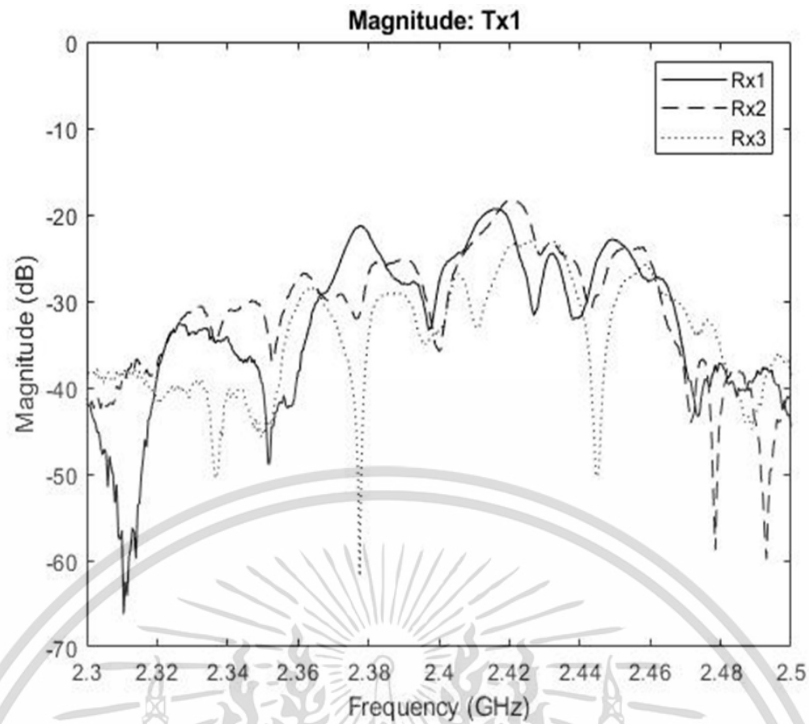
ขนาดของช่องสัญญาณการส่งผ่านของฟังก์ชันถ่ายโอนบอกถึงระดับความแรงของฟังก์ชันถ่ายโอนในโดเมนความถี่ที่พิจารณา ขนาดที่มีระดับความแรงของสัญญาณสูงนั้นหมายถึงสัญญาณมีการจางหายไปน้อย โดยที่เฟสที่มีความเป็นเชิงเส้นจะมีความเป็นช่องสัญญาณที่ดี ฟังก์ชันถ่ายโอนจะแสดงในรูปแบบของกราฟ 2 มิติ กำหนดแกน x คือ ความถี่ แกน y คือ ขนาดหรือเฟส โดยระดับความแรงของสัญญาณนั้นสามารถอ่านได้จากกราฟ ตัวอย่างผลการทดลองของขนาดและเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอน ณ ตำแหน่ง $Tx1$ $Tx2$ และ $Tx3$ เป็นด้านส่ง และตำแหน่งของสายอากาศรับอยู่ ณ ตำแหน่ง $A20$ ($Rx1$) $B20$ ($Rx2$) และ $C20$ ($Rx3$) ทั้งในกรณีที่ไม่มีการกีดขวางและมีสิ่งกีดขวางตามแบบจำลองการทดลองวิจัยที่แสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

5.2.1 กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

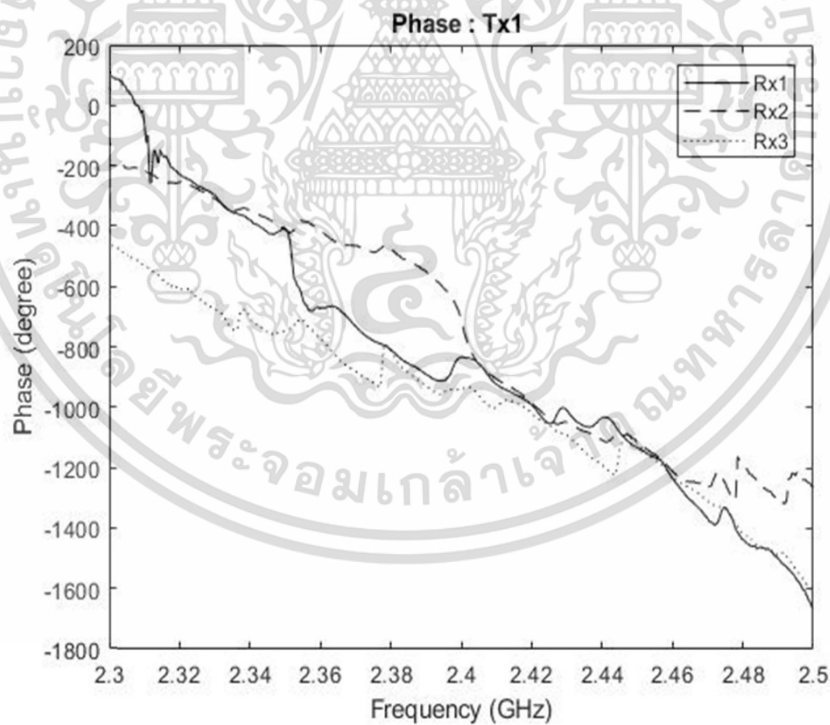
จากรูปที่ 5.1 ถึง 5.3 เป็นผลการวิเคราะห์ของขนาดและเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอน โดยที่ $Tx1$ อยู่ตำแหน่งด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้า $Tx2$ จะอยู่ประมาณตำแหน่งจุดกึ่งกลางของหม้อแปลงไฟฟ้า และ $Tx3$ อยู่ตำแหน่งด้านล่างของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งทั้ง 3 รูป จะสังเกตเห็นได้ว่าขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนใกล้เคียงกัน โดยที่ $Rx2$ หรือตำแหน่งกึ่งกลางของหม้อแปลงไฟฟ้ามีระดับสัญญาณสูงที่สุด โดยมีค่า -17.19 dB ส่วนที่ $Tx1$ หรือตำแหน่งด้านบนสุดของหม้อแปลงไฟฟ้ามีระดับสัญญาณน้อยที่สุด โดยมีค่า -18.54 dB เพราะตำแหน่งด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อส่งสัญญาณออกไป และเมื่อพิจารณาถึงลักษณะของเฟสพบว่า มีลักษณะเป็นเชิงเส้นบางส่วน เฟสที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่พบในผลการทดลองวิจัยแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ความถี่ต่าง ๆ โดยผลของเฟสมีความสอดคล้องกับขนาดเป็นอย่างดี สังเกตได้จากความถี่ที่เฟสไม่เป็นเชิงเส้นจะเป็นความถี่เดียวกันที่ขนาดมีระดับต่ำ ซึ่งเป็นผลกระทบที่เกิดจากการสะท้อนภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



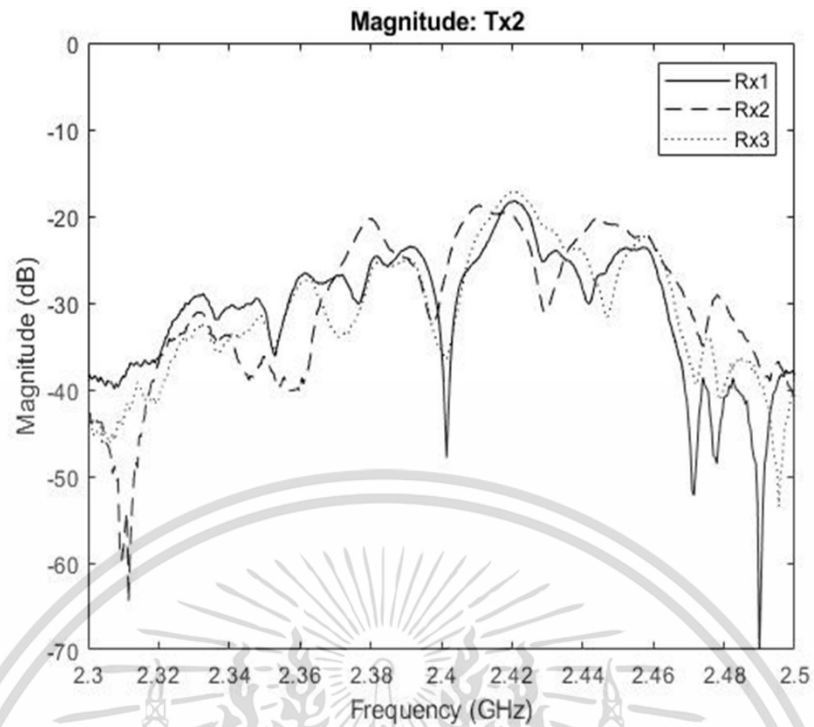
(ก) ขนาด



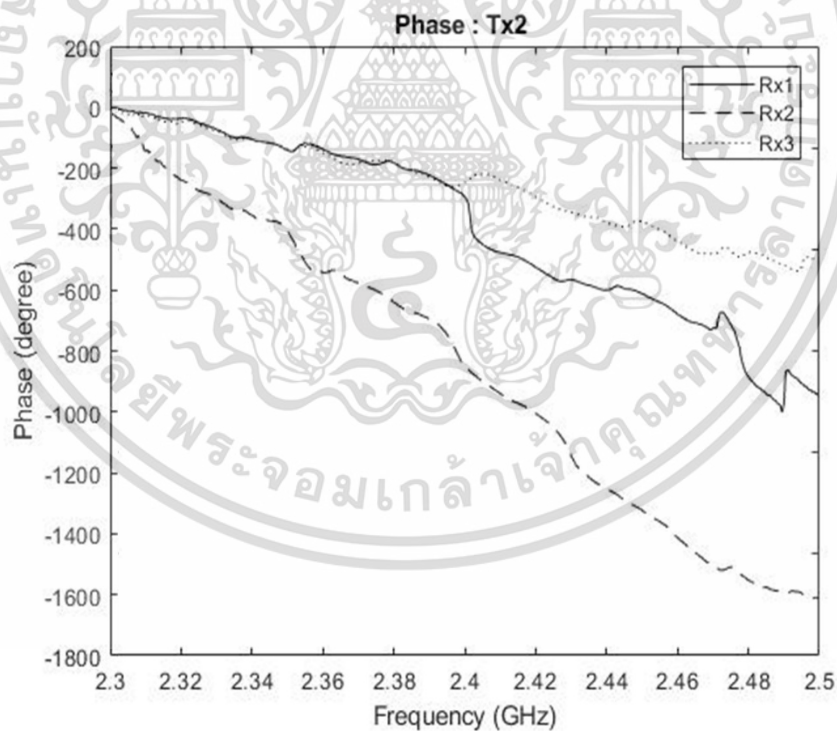
(ข) เฟส

รูปที่ 5.1 ตัวอย่างการเปรียบเทียบคุณลักษณะของช่องสัญญาณฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx1 เป็นต้นส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



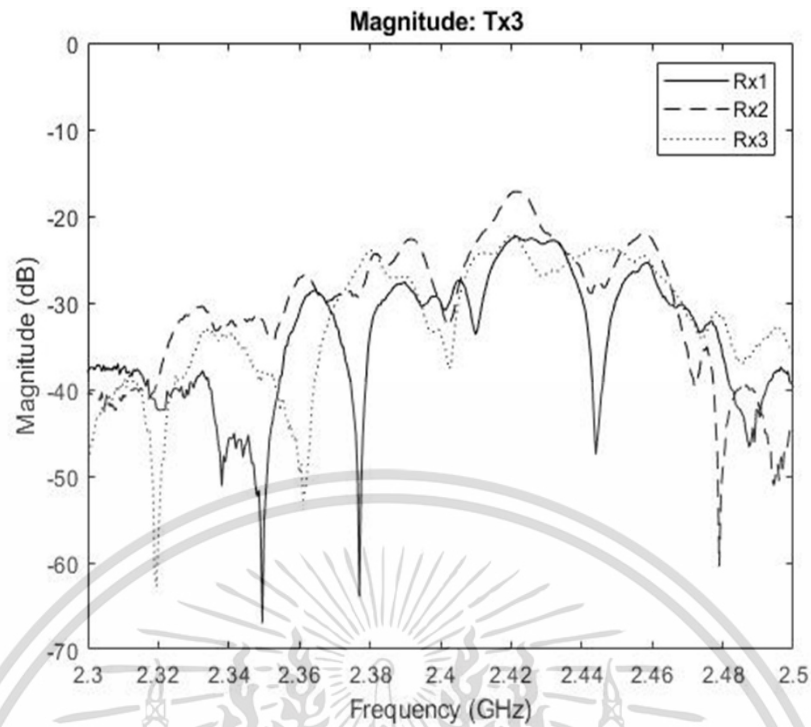
(ก) ขนาด



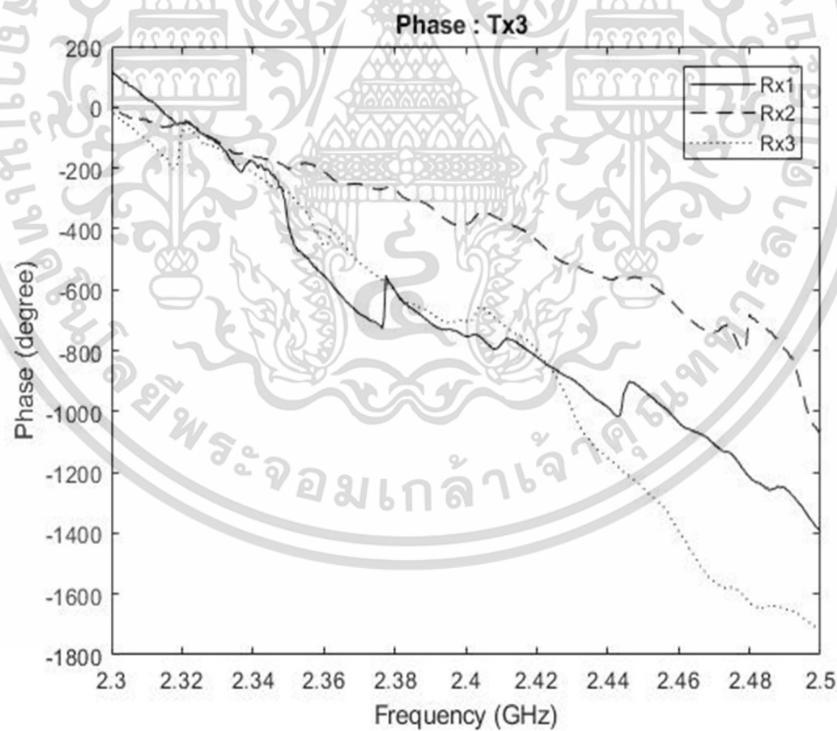
(ข) เฟส

รูปที่ 5.2 ตัวอย่างการเปรียบเทียบคุณลักษณะของช่องสัญญาณฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx2 เป็นต้นส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ขนาด



(ข) เฟส

รูปที่ 5.3 ตัวอย่างการเปรียบเทียบคุณลักษณะของช่องสัญญาณฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx2 เป็นต้นส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 กรณีมีสิ่งกีดขวาง

รูปที่ 5.4 ถึง 5.6 เป็นผลการวิเคราะห์ของขนาดและเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอน โดยที่ Tx1 อยู่ตำแหน่งด้านบนของผนังหม้อแปลงไฟฟ้า Tx2 จะอยู่ประมาณตำแหน่งจุดกึ่งกลางของผนังหม้อแปลงไฟฟ้า และ Tx3 อยู่ตำแหน่งด้านล่างของผนังหม้อแปลงไฟฟ้าในกรณีมีสิ่งกีดขวาง ทั้ง 3 รูปแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ผ่านการพิจารณาขนาดและเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อพิจารณาที่ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณจะสังเกตได้ว่ามีค่าลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง โดย ณ ตำแหน่งสายอากาศส่ง Tx1 มีระดับสัญญาณน้อยที่สุดเท่ากับ -29.40 dB และ ณ ตำแหน่ง Tx3 หรือตำแหน่งด้านล่างสุดของผนังหม้อแปลงไฟฟ้ามีระดับสัญญาณมากที่สุดเท่ากับ -24.88 dB เนื่องจากการทดลองวัดคุณลักษณะหม้อแปลงไฟฟ้าในครั้งนี้ได้มีสิ่งกีดขวางเข้ามาด้วยจึงทำให้เกิดการสะท้อนของสัญญาณมีเพิ่มมากขึ้นซึ่งอาจทำให้เกิดการเสริมกันของสัญญาณมากขึ้น ส่วนเฟสจะมีความเป็นเชิงเส้นน้อยลงอย่างเห็นได้ชัดเจน

5.2.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

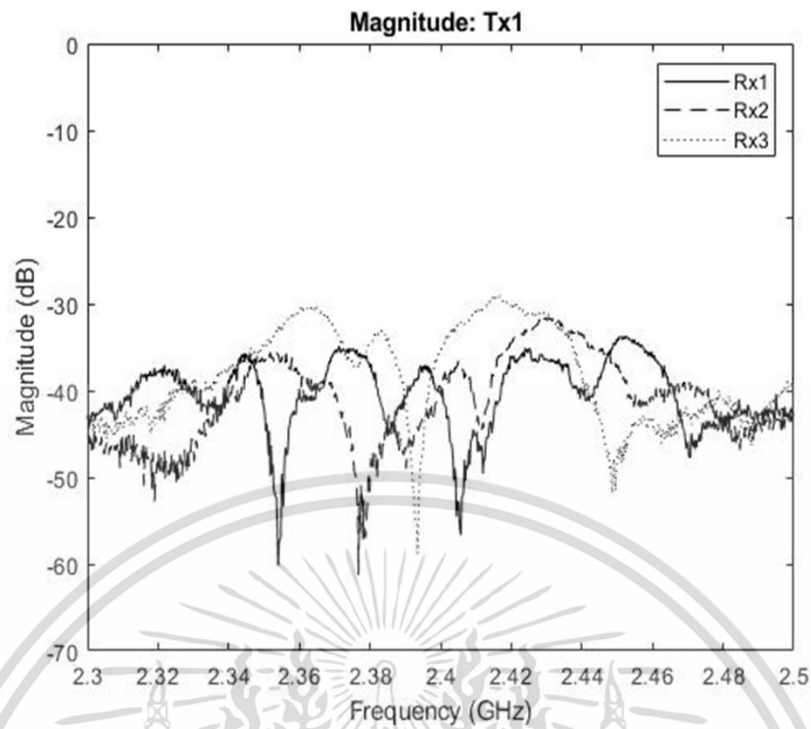
จากการวิเคราะห์ผลของฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างกรณีที่ไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง พบว่าสิ่งกีดขวางส่งผลกระทบต่อช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างมีนัยยะสำคัญ ซึ่งสังเกตได้อย่างชัดเจนจากขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนที่กรณีมีสิ่งกีดขวางจะมีขนาดลดลงเฉลี่ย 10 dB และ ณ ตำแหน่ง Rx2 และ Rx3 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่บริเวณตรงกลางและด้านล่างของหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ถูกบดบังจากสิ่งกีดขวางทำให้อส่งผลกระทบต่อช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้า นอกจากนี้ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณทำให้ทราบถึงคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟดียิ่งขึ้น สังเกตได้จากขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ต่าง ๆ ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ลดลงหมายถึงการที่ขนาดของสัญญาณที่รับได้มีค่าลดลง ซึ่งเกิดจากการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ณ ตำแหน่งของสายอากาศส่งและสายอากาศรับที่แตกต่างกัน จากผลการทดลองวิจัยที่ได้พิจารณาคคุณลักษณะของช่องสัญญาณทำให้สามารถทราบถึงลักษณะจำเพาะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น และ

เพื่อให้การวิเคราะห์มีความละเอียดยิ่งขึ้นจึงต้องวิเคราะห์เฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบกันขนาด จากการเปรียบเทียบเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและกรณีมีสิ่งกีดขวาง พบว่าทั้ง 2 กรณีมีเฟสเป็นเชิงเส้นบางส่วน แสดงให้เห็นถึงลักษณะของเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปตามช่วงความถี่ที่แตกต่างกันของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการสะท้อนและผลกระทบจาก

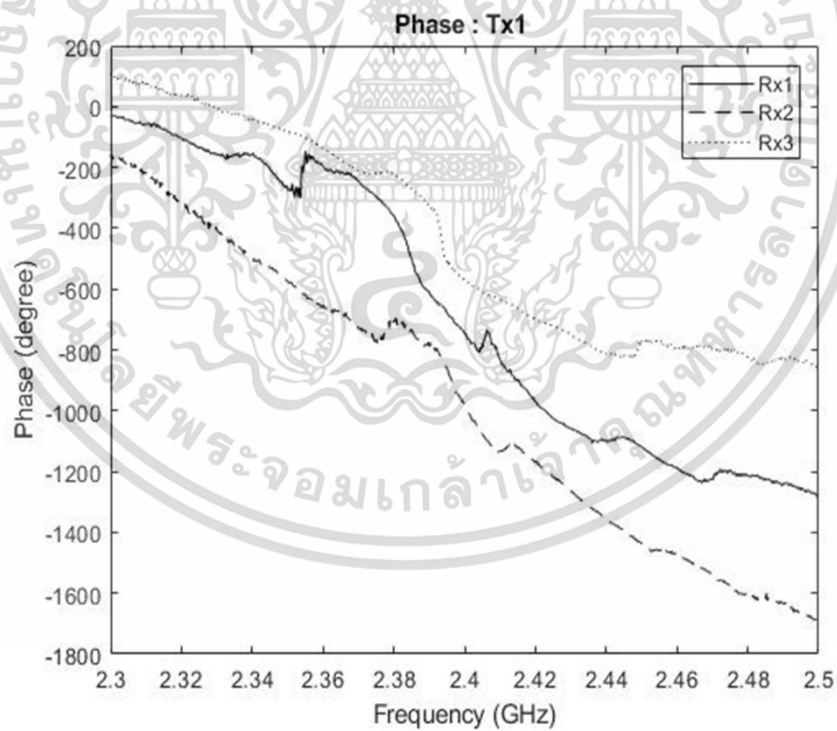
การบดบังของสิ่งกีดขวางภายในหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



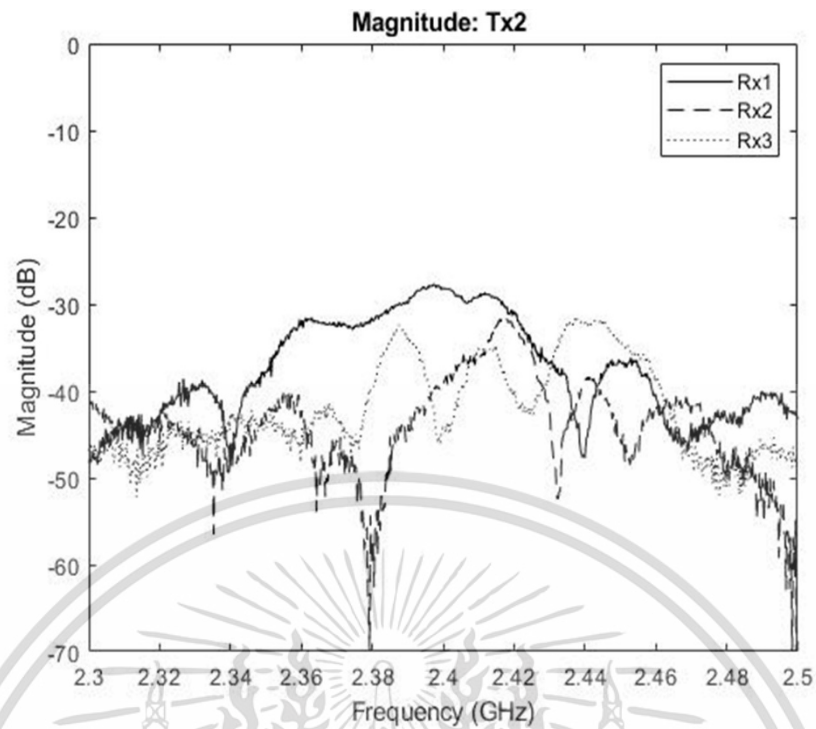
(ก) ขนาด



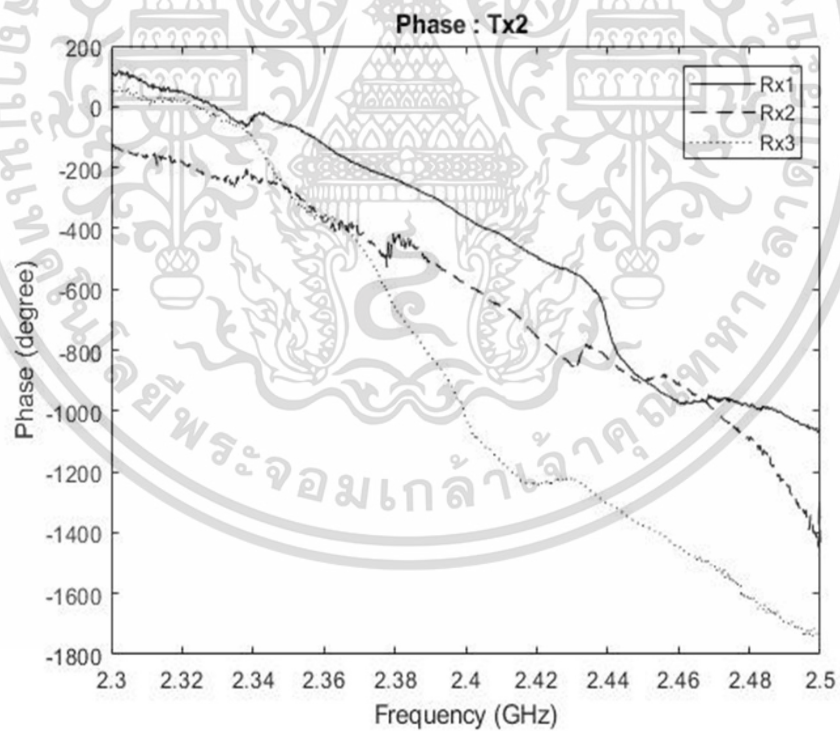
(ข) เฟส

รูปที่ 5.4 ตัวอย่างการเปรียบเทียบคุณลักษณะของช่องสัญญาณฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx1 เป็นต้นส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



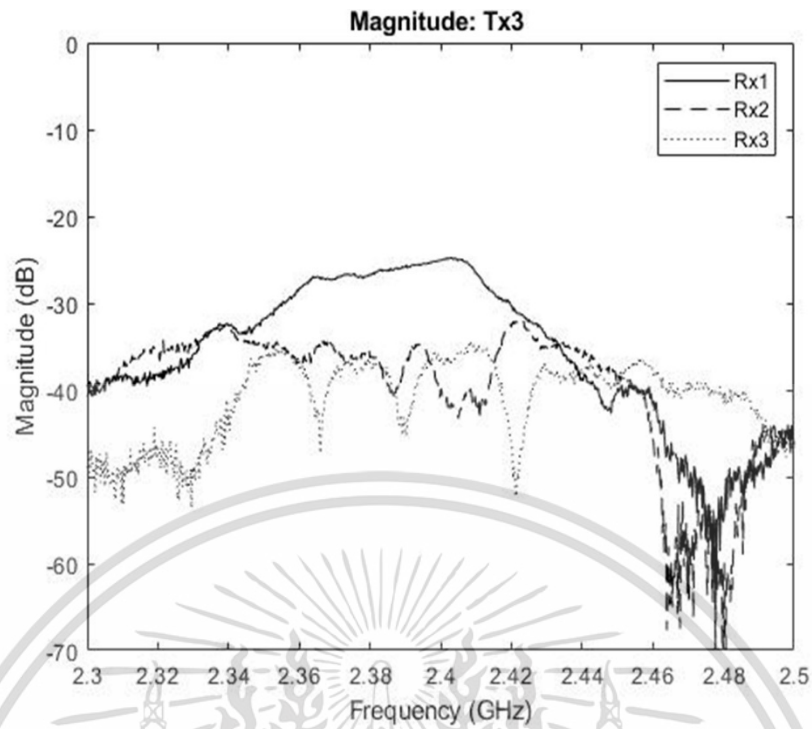
(ก) ขนาด



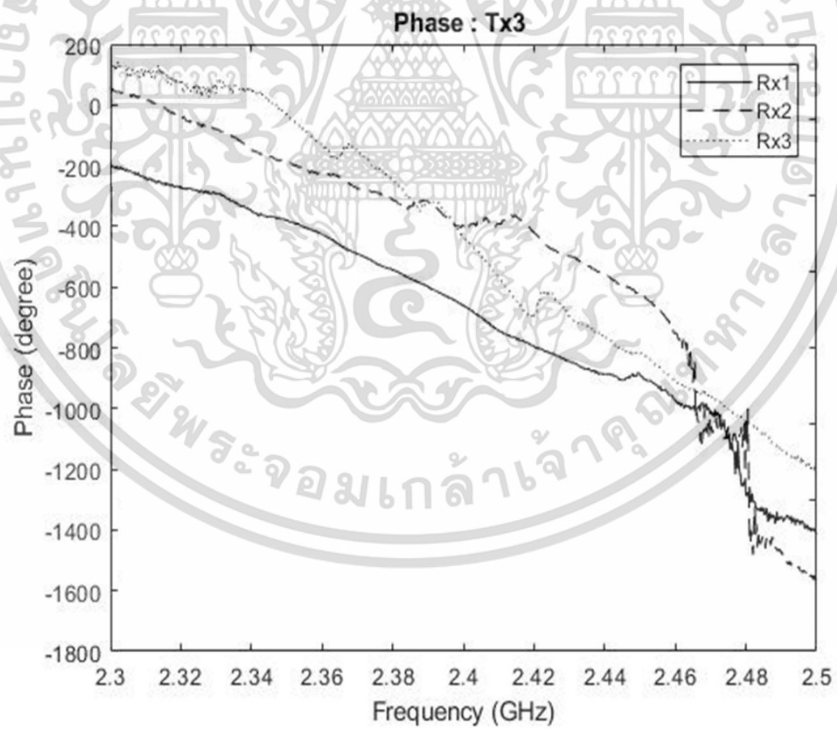
(ข) เฟส

รูปที่ 5.5 ตัวอย่างการเปรียบเทียบคุณลักษณะของช่องสัญญาณฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx2 เป็นต้นส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ขนาด



(ข) เฟส

รูปที่ 5.6 ตัวอย่างการเปรียบเทียบคุณลักษณะของช่องสัญญาณฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx3 เป็นต้นส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน

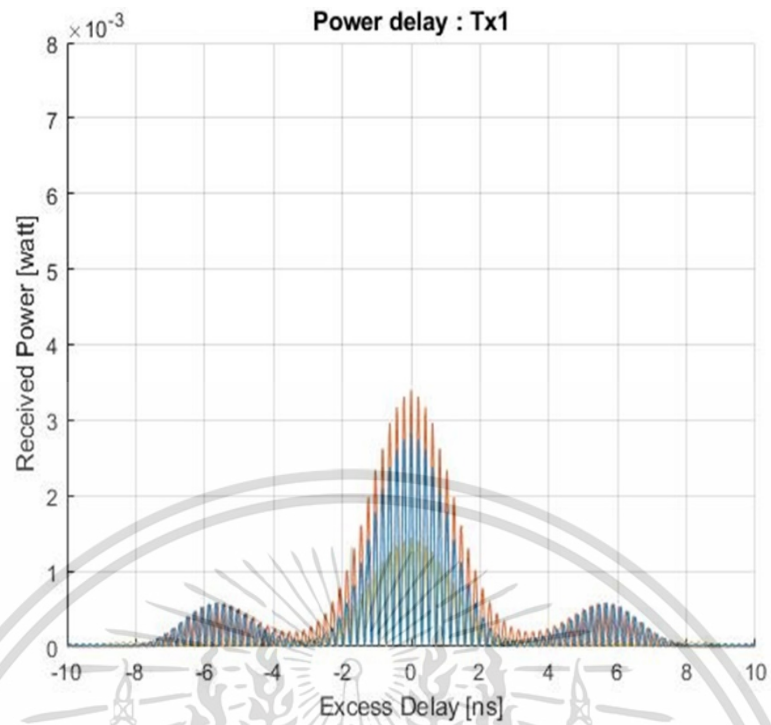
ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณเป็นการแสดงถึงระดับกำลังงานของสัญญาณที่เข้ามายังสายอากาศรับที่เวลาต่างกัน ภาพตัดข้างการประวิงกำลังงานมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการทำความเข้าใจคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้าและช่วยให้เข้าใจถึงผลกระทบของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบหลายวิถีวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการใช้วงจรกรองแบบแมตซ์เพื่อให้อัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยผลจากการใช้วงจรกรองแบบแมตซ์ทำให้สามารถทำการวิเคราะห์กำลังงานของสัญญาณที่รับได้ ณ เวลาเดียวกันได้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงผลการวิเคราะห์ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานในรูปแบบกราฟ 2 มิติ และ 3 มิติของภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx1 Tx2 และ Tx3 เป็นด้านส่ง และตำแหน่งของสายอากาศรับอยู่ ณ ตำแหน่ง A20 (Rx1) B20 (Rx2) และ C20 (Rx3) ทั้งในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวางตามแบบจำลองการทดลองวิจัยที่แสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

5.3.1 กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

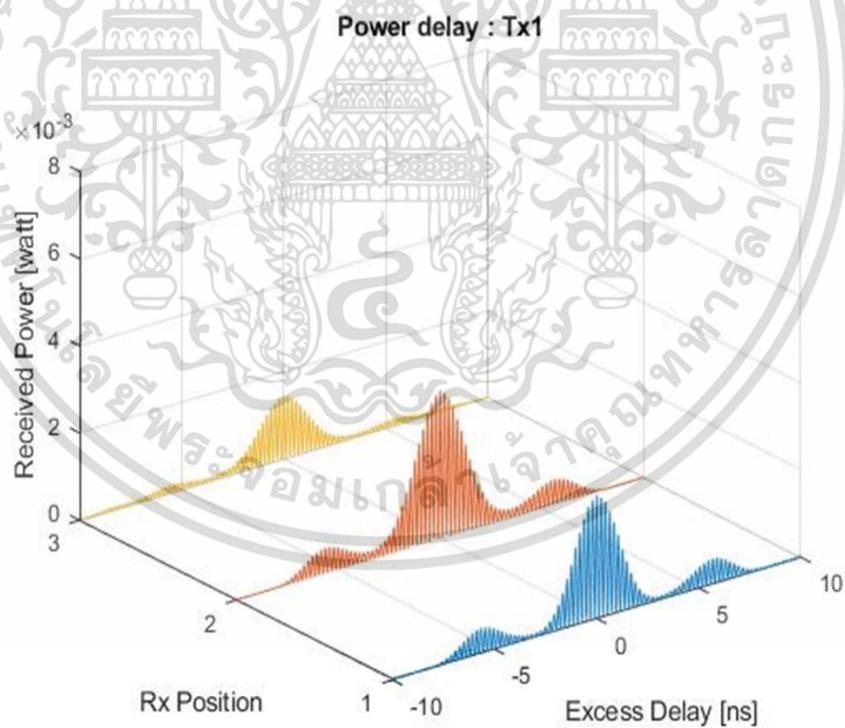
ผลการวิเคราะห์ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณที่ได้ผ่านการกรองสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้วงจรกรองแบบแมตซ์จะแสดงให้เห็นถึงระดับพลังงานที่รับได้แตกต่างกันออกไป ดังที่แสดงในรูป 5.7 ถึง 5.9 เนื่องจากการสะท้อนสัญญาณภายในหม้อแปลงไฟฟ้าไม่สามารถคาดการณ์ได้ ซึ่งอาจมีการหักล้างกันของสัญญาณหรือเกิดการจางหายของสัญญาณ ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ผ่านการวิเคราะห์ด้วยวงจรกรองแบบแมตซ์เพื่อให้ได้สัญญาณที่รับได้ที่เหมาะสมที่สุดและนำสัญญาณมาวิเคราะห์ ณ เวลาเดียวกันเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบภาพตัดข้างการประวิงกำลังงานระหว่างสายอากาศรับทั้ง 3 ตำแหน่ง จากรูปทั้ง 3 รูป จะแสดงให้เห็นถึงพลังงานที่รับได้สูงสุดต่างกันออกไป รูปที่ 5.7 แสดงภาพตัดข้างการประวิงกำลังงาน ณ ตำแหน่งสายอากาศ Tx1 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่ด้านข้างของผนังหม้อแปลงไฟฟ้า จะมีระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ ณ ตำแหน่ง Rx1 Rx 2 และ Rx3 สูงที่สุดที่ 2.7 มิลลิวัตต์ 3.3 มิลลิวัตต์ และ 1.4 มิลลิวัตต์ตามลำดับ รูปที่ 5.8 แสดงภาพตัดข้างการประวิงกำลังงาน ณ ตำแหน่งสายอากาศ Tx2 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่ด้านข้างของผนังหม้อแปลงไฟฟ้า จะมีระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ ณ ตำแหน่ง Rx1 Rx 2 และ Rx3 สูงที่สุดที่ 3.3 มิลลิวัตต์ 4.7 มิลลิวัตต์ และ 4.1 มิลลิวัตต์ตามลำดับ และรูปที่ 5.9 แสดงภาพตัดข้างการประวิงกำลังงาน ณ ตำแหน่งสายอากาศ Tx3 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่ด้านข้างของผนังหม้อแปลงไฟฟ้า จะมีระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ ณ ตำแหน่ง Rx1 Rx 2 และ Rx3 สูงที่สุดที่ 1.7 มิลลิวัตต์ 4.3 มิลลิวัตต์ และ 2.2 มิลลิวัตต์ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าหากพิจารณาจากตำแหน่งของสายอากาศส่ง ที่ Tx 2 ซึ่งเป็นตำแหน่งกึ่งกลางของผนังหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีระดับกำลังงานเฉลี่ยสูงสุด และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งสายอากาศรับ ที่ Rx2 หรือตำแหน่งความสูงกึ่งกลางของผนังหม้อแปลงไฟฟ้านั้นมีระดับกำลังงานที่รับได้สูงที่สุดอยู่ที่เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ระดับของสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีระดับเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



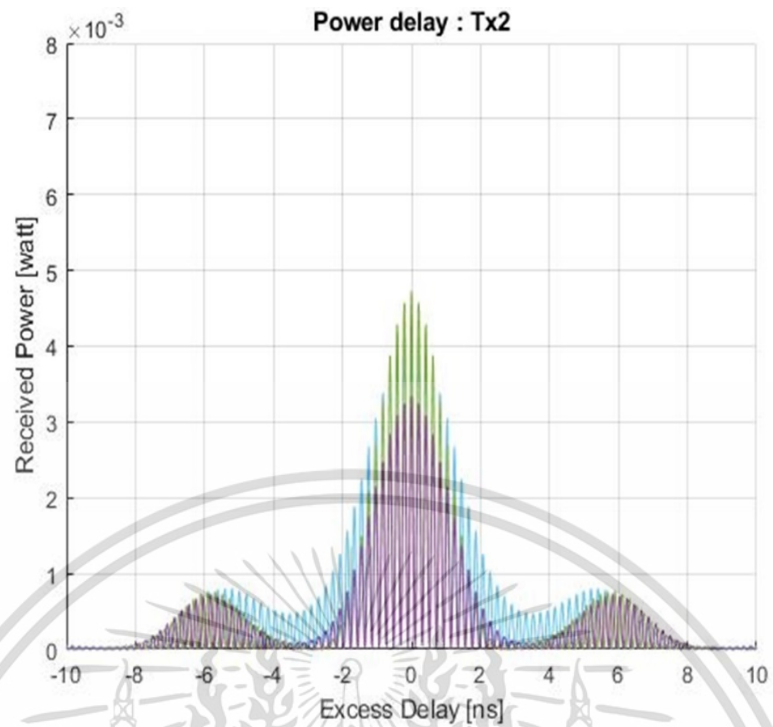
(ก) 2 มิติ



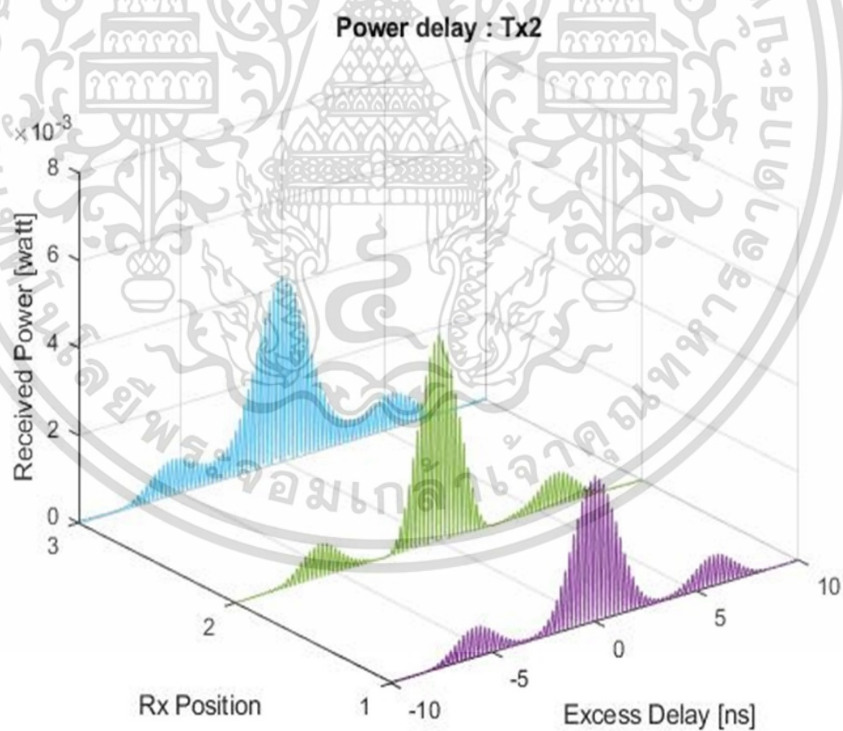
(ข) 3 มิติ

รูปที่ 5.7 ตัวอย่างการเปรียบเทียบภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx1 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



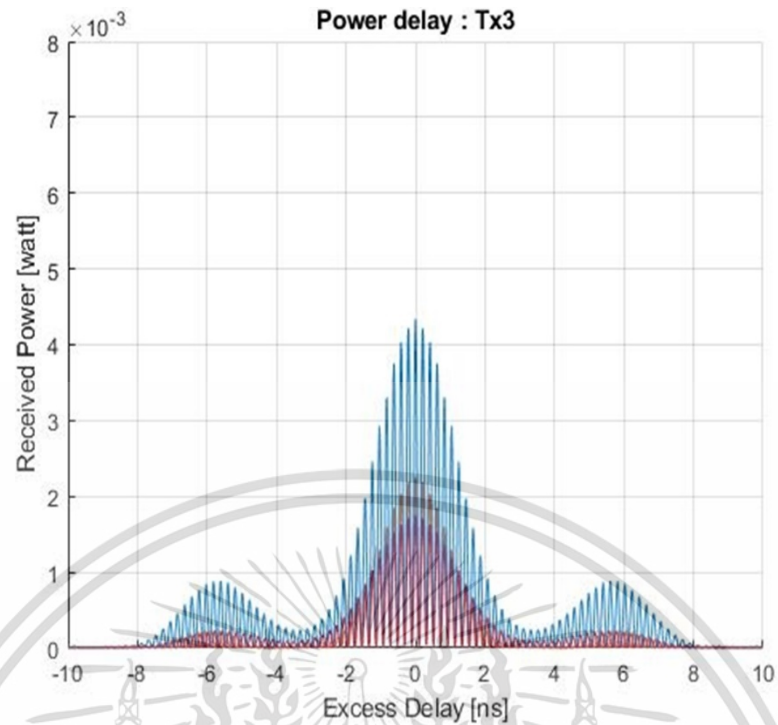
(ก) 2 มิติ



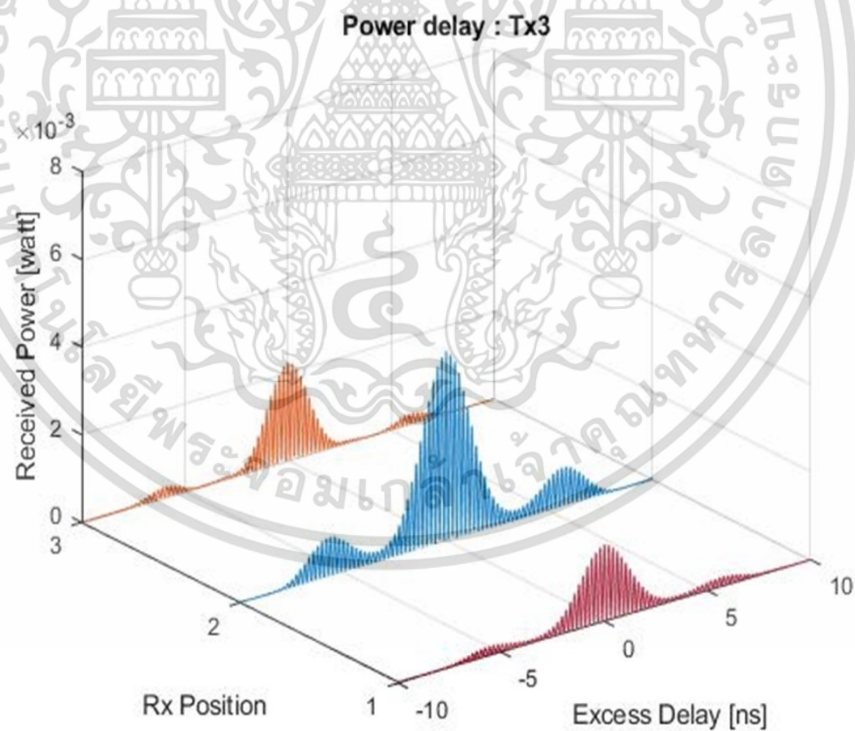
(ข) 3 มิติ

รูปที่ 5.8 ตัวอย่างการเปรียบเทียบภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx2 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) 2 มิติ



(ข) 3 มิติ

รูปที่ 5.9 ตัวอย่างการเปรียบเทียบภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2 กรณีมีสิ่งกีดขวาง

ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณที่ได้ผ่านการกรองสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้วงจรกรองแบบแมตซ์จะแสดงให้เห็นถึงระดับพลังงานที่รับได้แตกต่างกันออกไป ดังที่แสดงในรูป 5.10 ถึง 5.12 เนื่องจากการสะท้อนสัญญาณภายในหม้อแปลงไฟฟ้าไม่สามารถคาดการณ์ได้ ซึ่งอาจมีการหักล้างกันของสัญญาณหรือเกิดการจางหายของสัญญาณ ระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ผ่านการวิเคราะห์ด้วยวงจรกรองแบบแมตซ์เพื่อให้ได้สัญญาณที่รับได้ที่เหมาะสมที่สุด และนำสัญญาณมาวิเคราะห์ ณ เวลา เดียวกันเพื่อให้งานต่อการวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบภาพตัดข้างการประวิงกำลังงานระหว่างสายอากาศรับทั้ง 3 ตำแหน่ง จากรูปทั้ง 3 รูป จะแสดงให้เห็นถึงพลังงานที่รับได้สูงสุดต่างกันออกไป รูปที่ 5.10 แสดงภาพตัดข้างการประวิงกำลังงาน ณ ตำแหน่งสายอากาศ Tx1 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่ด้านข้างของผนังหม้อแปลงไฟฟ้า จะมีระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ ณ ตำแหน่ง Rx1 Rx 2 และ Rx3 สูงที่สุดที่ 0.46 มิลลิวัตต์ 0.18 มิลลิวัตต์ และ 0.07 มิลลิวัตต์ ตามลำดับ รูปที่ 5.11 แสดงภาพตัดข้างการประวิงกำลังงาน ณ ตำแหน่งสายอากาศ Tx2 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่ด้านข้างของผนังหม้อแปลงไฟฟ้า จะมีระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ ณ ตำแหน่ง Rx1 Rx 2 และ Rx3 สูงที่สุดที่ 0.81 มิลลิวัตต์ 0.19 มิลลิวัตต์ และ 0.1 มิลลิวัตต์ตามลำดับ และรูปที่ 5.12 แสดงภาพตัดข้างการประวิงกำลังงาน ณ ตำแหน่งสายอากาศ Tx3 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่ด้านข้างของผนังหม้อแปลงไฟฟ้า จะมีระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ ณ ตำแหน่ง Rx1 Rx 2 และ Rx3 สูงที่สุดที่ 1.52 มิลลิวัตต์ 0.2 มิลลิวัตต์ และ 0.16 มิลลิวัตต์ตามลำดับ

5.3.3 วิจัยรณผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองของภาพตัดข้างการประวิงกำลังงานทั้งในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและกรณีมีสิ่งกีดขวางโดยนำช่องสัญญาณที่วัดได้มาผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ ทำให้ทราบถึงคุณลักษณะของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่รับได้ ณ ตำแหน่งสายอากาศส่งและสายอากาศรับที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณากรณีไม่มีสิ่งกีดขวางจะสังเกตได้ว่า ณ ตำแหน่ง Rx2 เป็นสายอากาศรับจะมีระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้สูงที่สุด เนื่องจากเป็นระดับความสูงที่เท่ากับระดับความสูงของสายอากาศส่งและจะสังเกตได้ว่า ณ ตำแหน่ง Tx2 เป็นสายอากาศส่งจะมีระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้สูงกว่า ณ ตำแหน่ง Tx1 และ Tx3 เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่อยู่ตรงกลางของผนังหม้อแปลงจึงมีผลกระทบจากการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากผนังหม้อแปลงไฟฟ้าน้อยกว่า และเมื่อพิจารณากรณีที่มีสิ่งกีดขวางจะสังเกตได้ว่าระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ ณ ตำแหน่ง Rx2 และ Rx3 จะมีระดับต่ำกว่าตำแหน่ง Rx1 อย่างมีนัยยะสำคัญ เนื่องจากได้รับผลกระทบจากการบดบังของสิ่งกีดขวางซึ่งใส่เข้าไปตรงกลางของตัวหม้อแปลงไฟฟ้า อย่างไรก็ตามจะสังเกตได้ว่าเมื่อใส่สิ่งกีดขวางเข้าไปในหม้อแปลงไฟฟ้าจะส่งผลต่อการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างเห็นได้ชัด ทั้งในการบดบังของสัญญาณและการสะท้อนของของสัญญาณ ซึ่งทำให้สัญญาณเกิดการส่งเสริมหรือหักล้างกันได้ เช่น การส่งเสริมกันของสัญญาณในกรณีมีสิ่งกีดขวาง โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx3

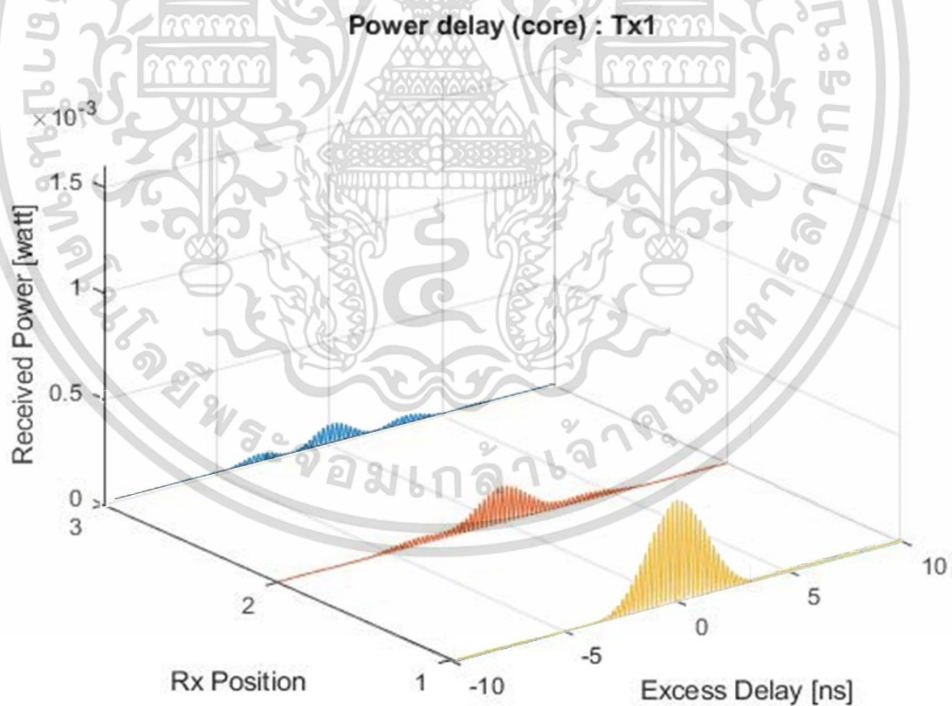
เป็นด้านส่งและตำแหน่ง Rx1 เป็นด้านรับ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) 2 มิติ



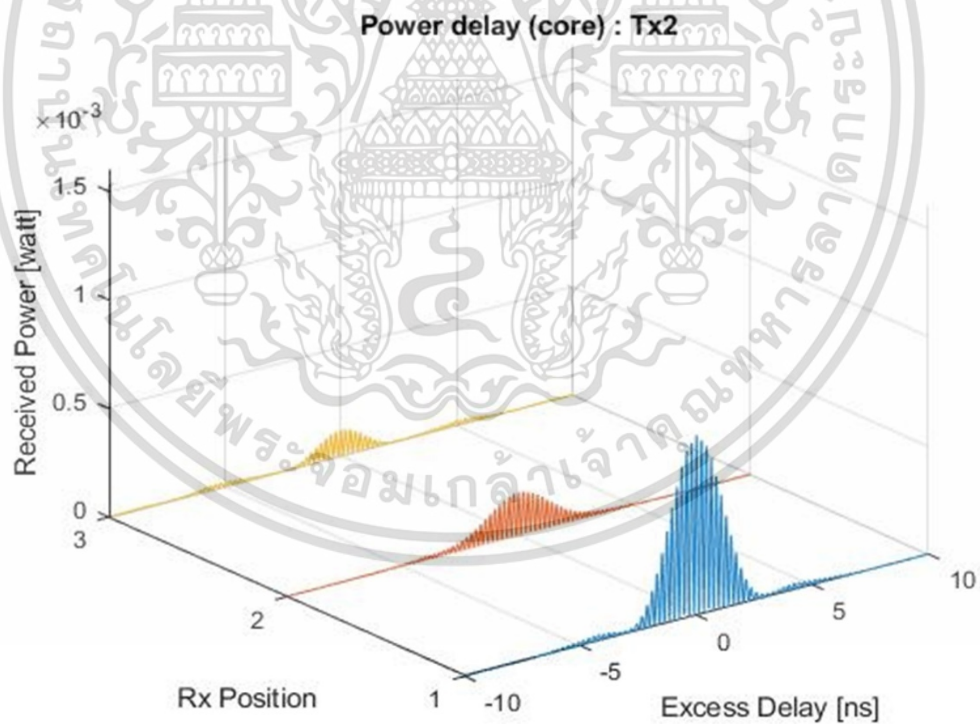
(ข) 3 มิติ

รูปที่ 5.10 ตัวอย่างการเปรียบเทียบภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx1 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



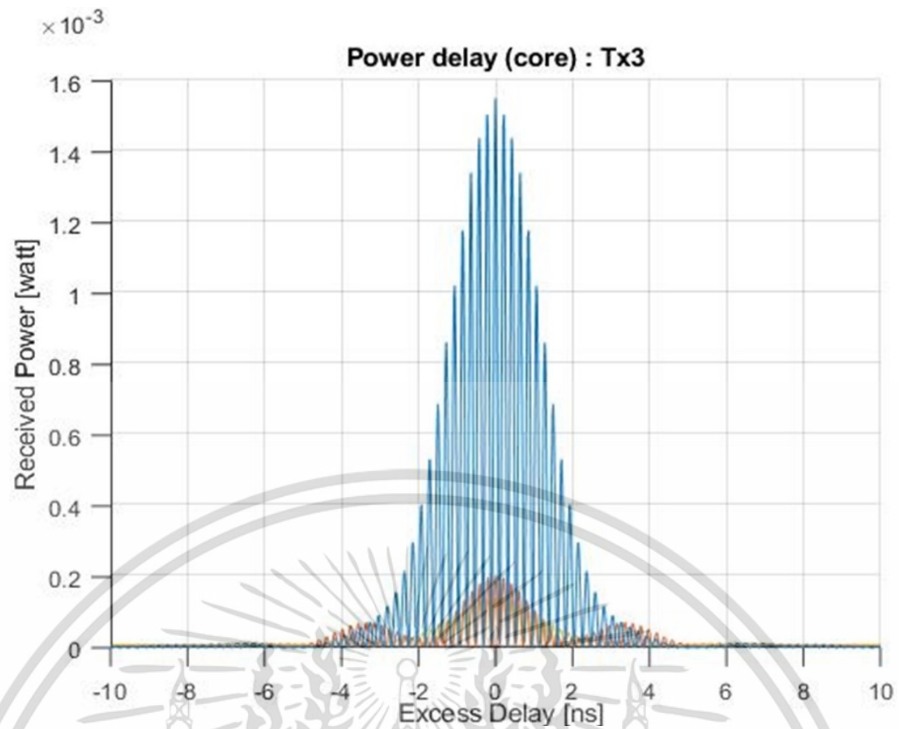
(ก) 2 มิติ



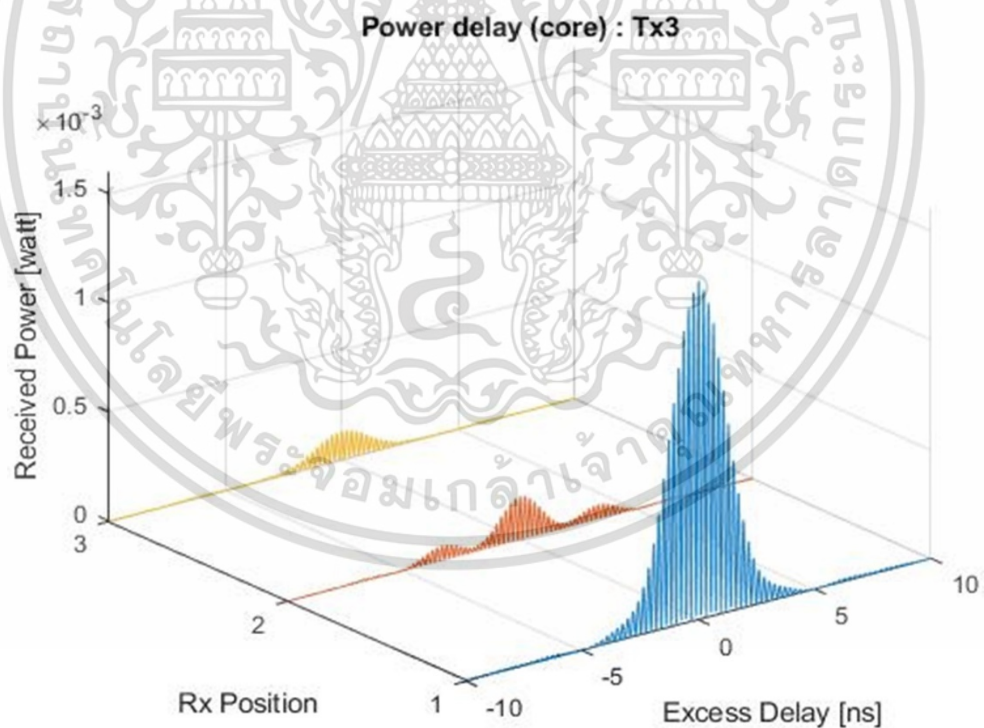
(ข) 3 มิติ

รูปที่ 5.11 ตัวอย่างการเปรียบเทียบภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx2 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) 2 มิติ



(ข) 3 มิติ

รูปที่ 5.12 ตัวอย่างการเปรียบเทียบภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 การสูญเสียเชิงวิถี

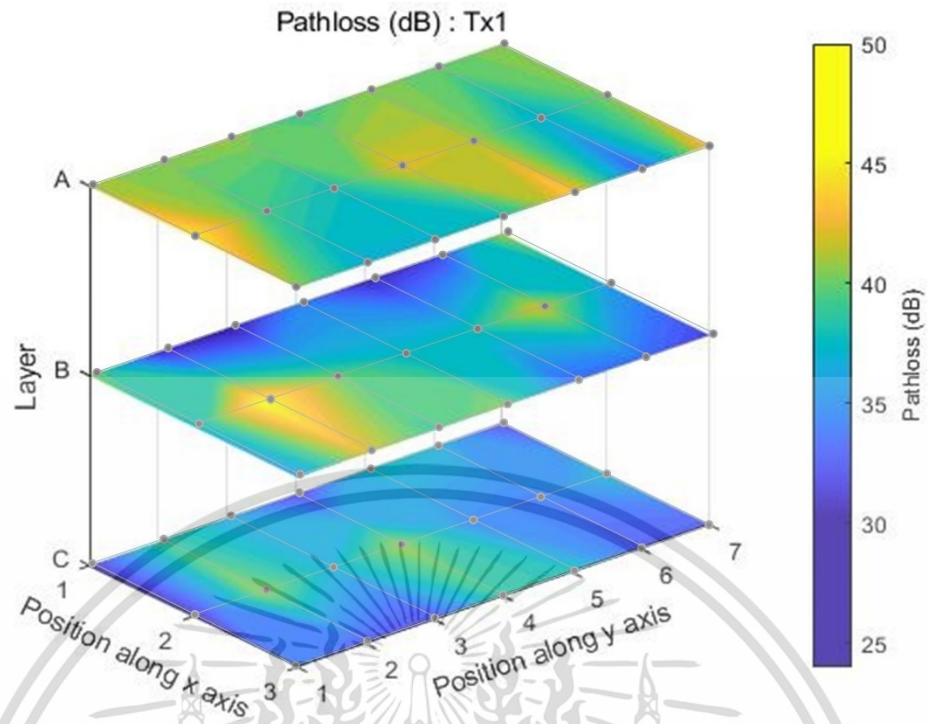
การสูญเสียเชิงวิถีของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถการนำผลการทดลองวัดที่ได้จากการทดลองตามแบบจำลองที่นำเสนอในบทที่ 4 ไปคำนวณตามทฤษฎีที่นำเสนอไปในบทที่ 3 จากนั้นทำการเปรียบเทียบระหว่างกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและกรณีมีสิ่งกีดขวาง นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบผลระหว่างการใช้วงจรกรองแบบแมตซ์และใช้วงจรกรองแบบแมตซ์ เพื่อให้วิเคราะห์ช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีในรูปแบบคอนทัวร์ 3 มิติเพื่อให้เข้าใจถึงลักษณะและความสัมพันธ์ของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้าได้ละเอียดยิ่งขึ้น ซึ่งมีการกำหนดตำแหน่งของสายอากาศส่งและสายอากาศรับตามแบบจำลองการทดลองวิจัยในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวางที่แสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับและแสดงการเปรียบเทียบการสูญเสียเชิงวิถีในรูปที่ 5.13 ถึง 5.18 ซึ่งแถบสีน้ำเงินหมายถึงระดับการสูญเสียเชิงวิถีต่ำและแถบสีเหลืองหมายถึงระดับการสูญเสียเชิงวิถีสูง

5.4.1 กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

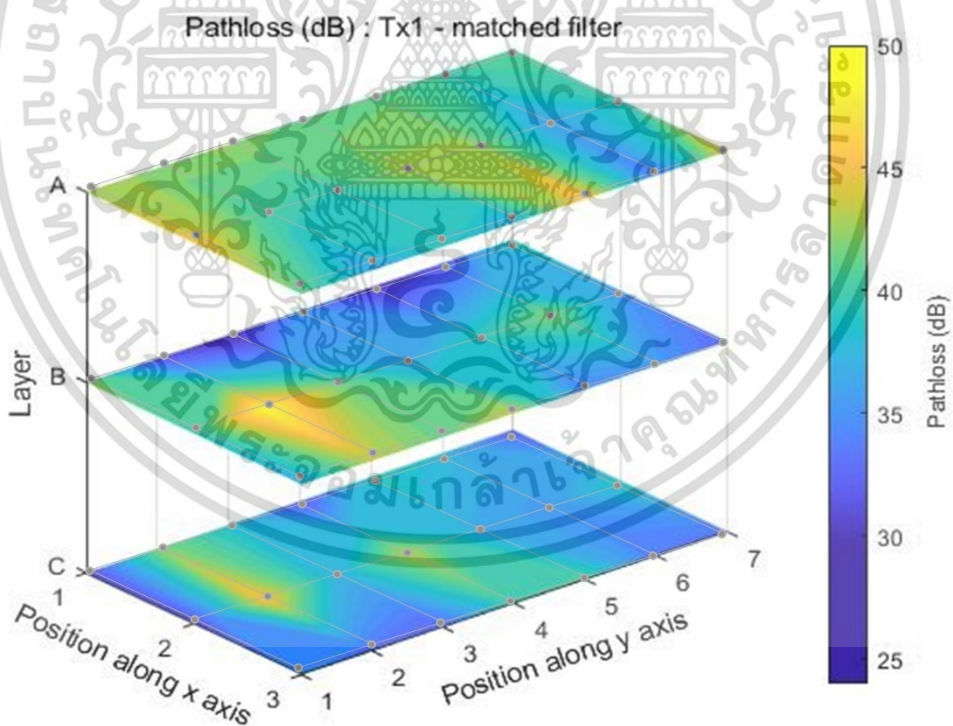
การวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้วงจรกรองแบบแมตซ์และใช้วงจรกรองแบบแมตซ์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.13 ถึง 5.15 จากผลการทดลองจะเห็นว่า การสูญเสียเชิงวิถีในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางพิจารณา ณ $Tx1$ $Tx2$ และ $Tx3$ เป็นด้านส่งมีระดับของการสูญเสียเชิงวิถีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยในระดับชั้นบนและล่างจะมีระดับการสูญเสียเชิงวิถีเฉลี่ยสูงกว่าระดับชั้นกลาง เนื่องจากระดับชั้นบนสุดมีการรบกวนจากสัญญาณภายนอกได้ง่ายและในระดับชั้นล่างมีการสะท้อนของพื้นหม้อแปลง นอกจากนี้ยังเกิดจากการที่ระดับความสูงของสายอากาศส่งและสายอากาศรับไม่เท่ากัน ทำให้เกิดการสูญเสียเชิงวิถีมากกว่าระดับชั้นกลางซึ่งมีระดับความสูงของสายอากาศส่งและสายอากาศรับเท่ากัน และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างกรณีไม่ใช้วงจรกรองแบบแมตซ์และใช้วงจรกรองแบบแมตซ์จะสังเกตได้ว่าในกรณีที่ใช้วงจรกรองแบบแมตซ์จะมีระดับการสูญเสียเชิงวิถีต่ำกว่ากรณีไม่ใช้วงจรกรองแบบแมตซ์อย่างเห็นได้ชัด โดยพิจารณาได้จากสีน้ำเงินที่มีเพิ่มขึ้น และสาเหตุที่บางตำแหน่งที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีระยะใกล้มีการสูญเสียเชิงวิถีสูงกว่าตำแหน่งที่ระยะห่างระยะไกล เนื่องจากการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้าทำให้เกิดการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับผนังหม้อแปลงไฟฟ้าจากหลายทิศทาง ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนอาจจะส่งเสริมกันหรือหักล้างกันทำให้สามารถคาดการณ์การสูญเสียเชิงวิถีได้ยาก เมื่อพิจารณารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่าง ๆ จะสังเกตได้ว่า ณ ตำแหน่ง $Tx1$ และ $Tx3$ เป็นด้านส่งจะมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใกล้เคียงกัน เนื่องจากเป็นตำแหน่งด้านส่งที่อยู่ใกล้กับผนังด้านข้างของหม้อแปลงทั้ง 2 ตำแหน่งในทางกลับกัน ณ ตำแหน่ง $Tx2$ เป็นด้านส่งจะมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแตกต่างกับอีก 2 ตำแหน่งอย่างเห็นได้ชัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



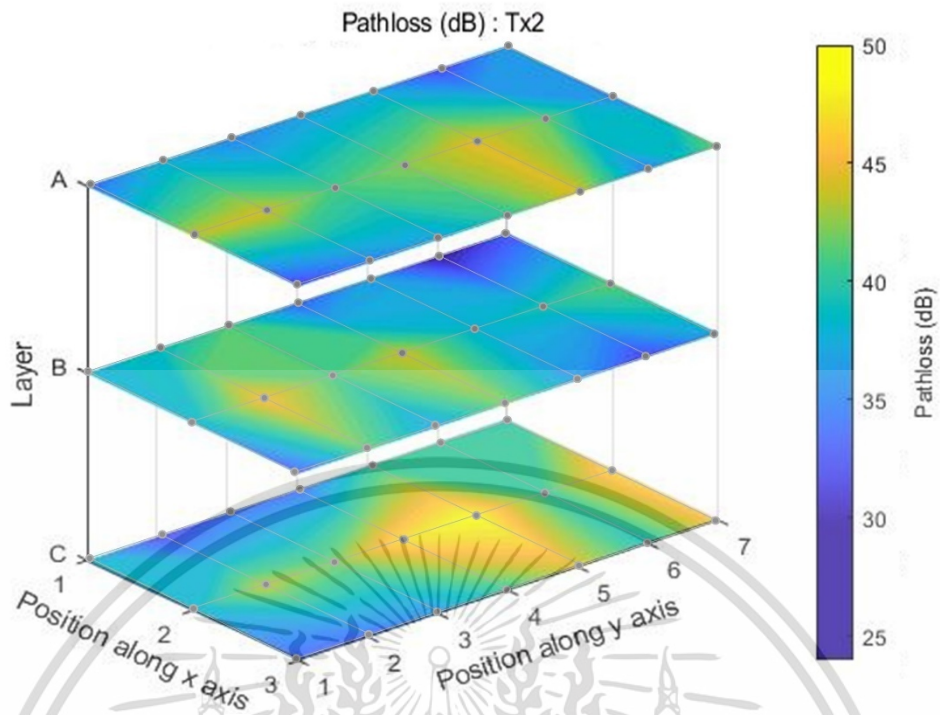
(ก) ไม่ใช้วงจรกรองแบบแมตช์



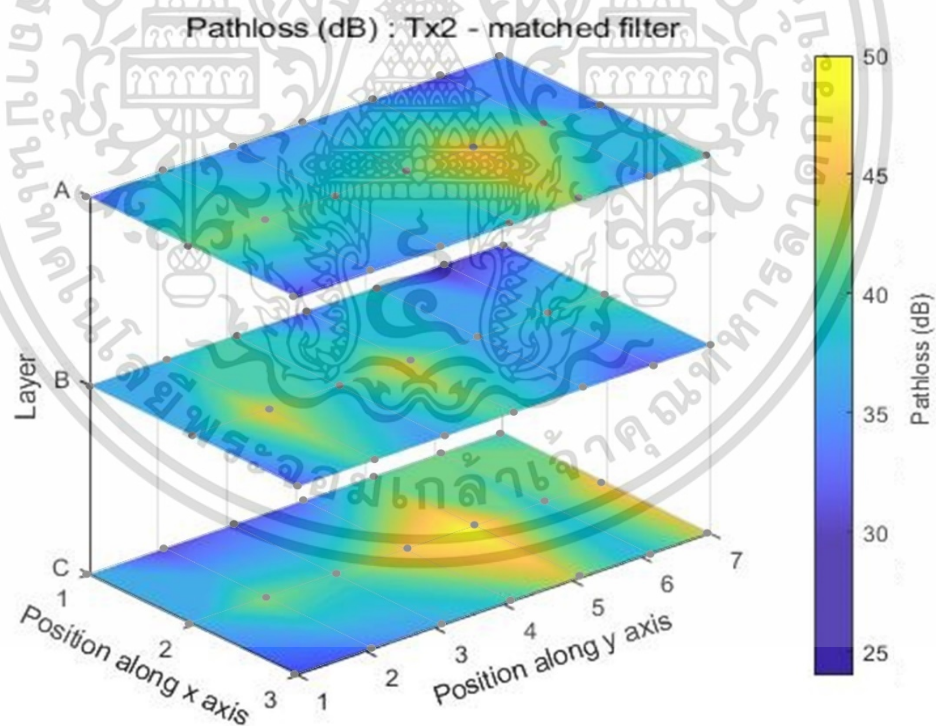
(ข) ใช้วงจรกรองแบบแมตช์

รูปที่ 5.13 ตัวอย่างการเปรียบเทียบการสูญเสียเชิงวิถีระหว่างไม่ใช้วงจรกรองแบบแมตช์และใช้วงจรกรองแบบแมตช์โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx1 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

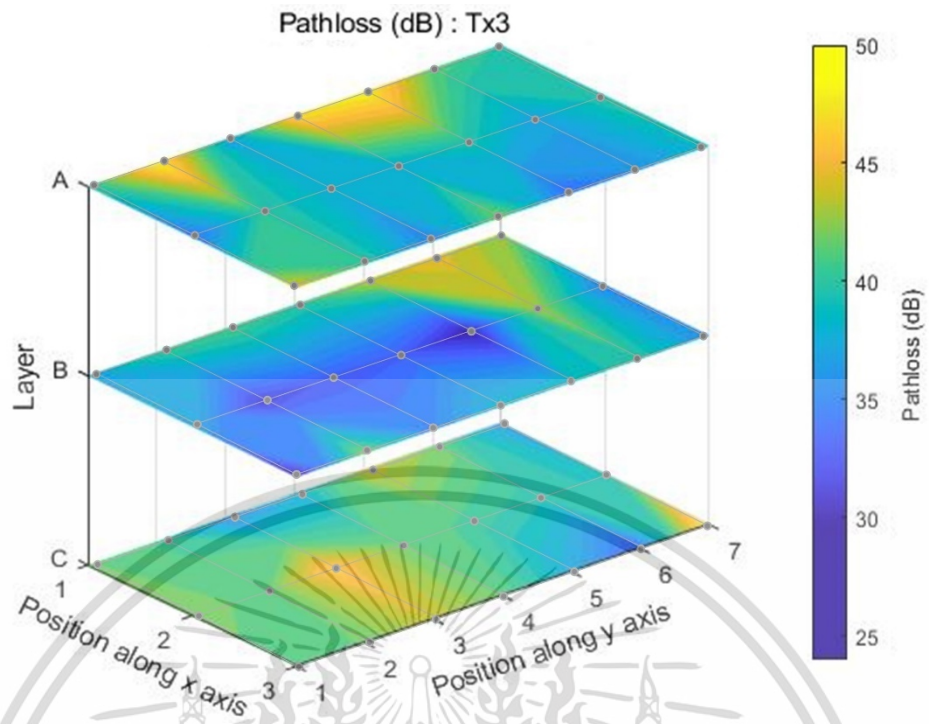


(ก) ไม่ใช้วงจรกรองแบบแมตช์

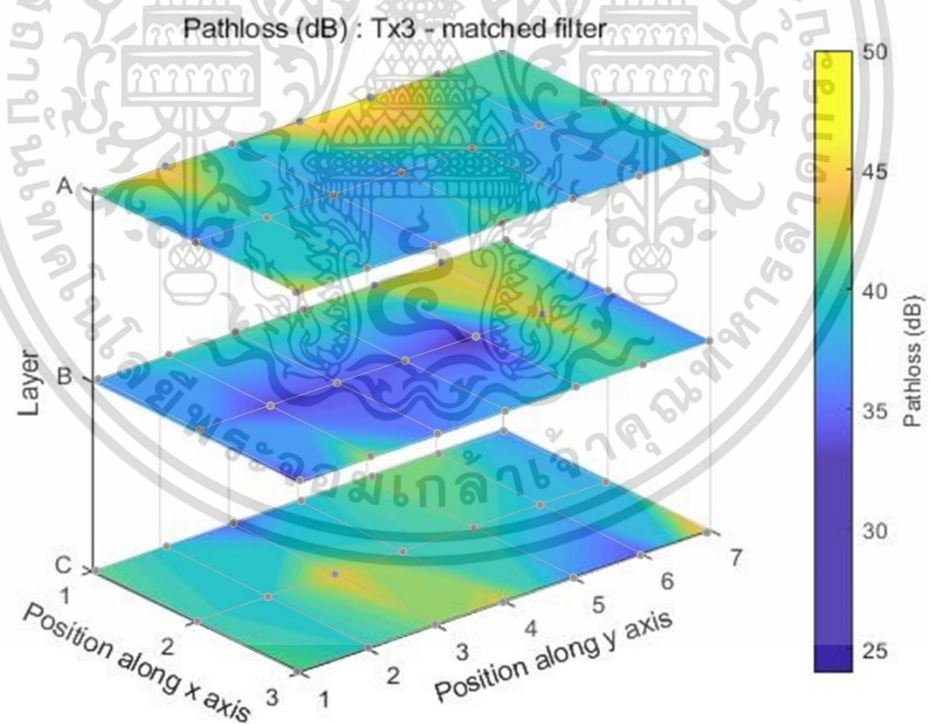


(ข) ใช้วงจรกรองแบบแมตช์

รูปที่ 5.14 ตัวอย่างการเปรียบเทียบการสูญเสียเชิงวิถีระหว่างไม่ใช้วงจรกรองแบบแมตช์และใช้วงจรกรองแบบแมตช์โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx2 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ไม่ใช้วงจรกรองแบบแมตช์



(ข) ใช้วงจรกรองแบบแมตช์

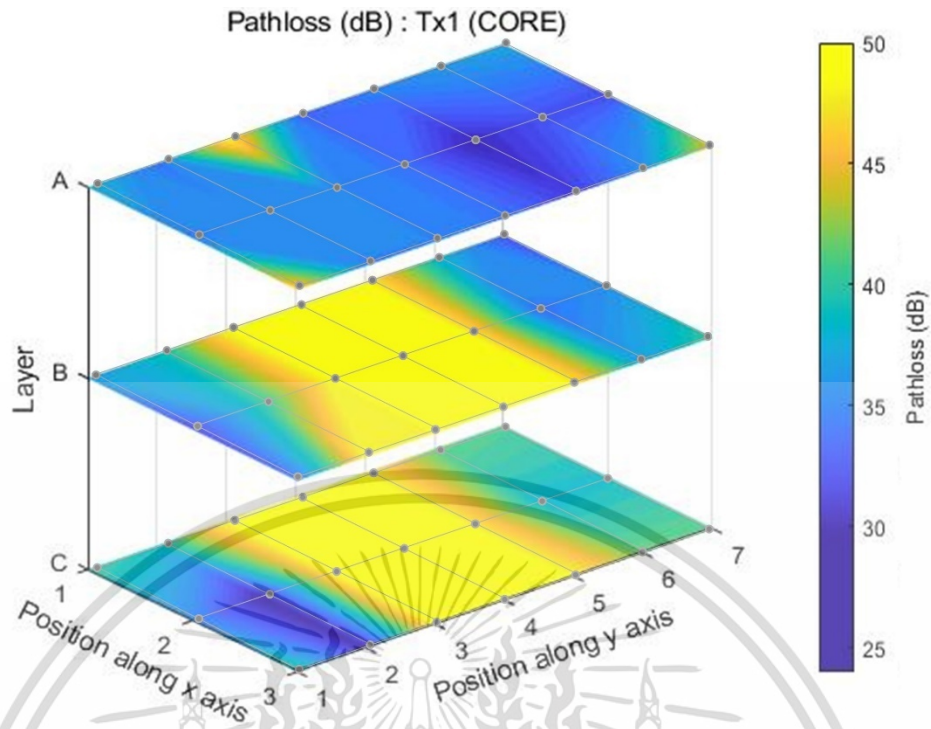
รูปที่ 5.15 ตัวอย่างการเปรียบเทียบการสูญเสียเชิงวิถีระหว่างไม่ใช้วงจรกรองแบบแมตช์และใช้วงจรกรองแบบแมตช์โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx3 เป็นต้นส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.2 กรณีมีสิ่งกีดขวาง

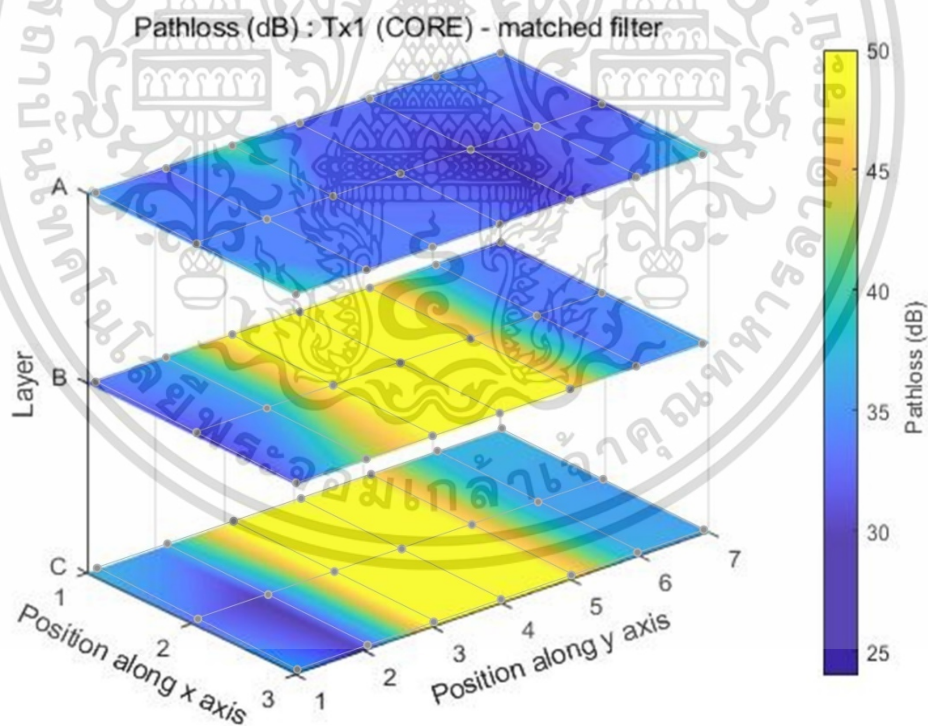
การวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีมีสิ่งกีดขวาง โดยเปรียบเทียบระหว่างการไม่ใช้วงจรกรองแบบแมตซ์และใช้วงจรกรองแบบแมตซ์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.16 ถึง 5.18 จากผลการทดลองจะเห็นว่า การสูญเสียเชิงวิถีในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางพิจารณา ณ $Tx1$ $Tx2$ และ $Tx3$ เป็นด้านส่งมีระดับของการสูญเสียเชิงวิถีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยในระดับชั้นกลางและล่างจะมีระดับการสูญเสียเชิงวิถีสูงกว่าระดับชั้นบน เนื่องจากได้รับผลกระทบจากการบดบังของสิ่งกีดขวางบริเวณตรงกลางหม้อแปลงไฟฟ้าทำให้เกิดการสูญเสียเชิงวิถีเฉลี่ยสูง ในขณะที่ระดับชั้นบนไม่ถูกบดบังจากสิ่งกีดขวางทำให้มีระดับการสูญเสียเชิงวิถีเฉลี่ยต่ำ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการไม่ใช้วงจรกรองแบบแมตซ์และใช้วงจรกรองแบบแมตซ์จะสังเกตได้ว่าในกรณีที่ใช้วงจรกรองแบบแมตซ์จะมีระดับการสูญเสียเชิงวิถีต่ำกว่ากรณีไม่ใช้วงจรกรองแบบแมตซ์อย่างมีนัยสำคัญ โดยพิจารณาได้จากสีน้ำเงินที่มีเพิ่มขึ้น และสาเหตุที่บางตำแหน่งที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีระยะใกล้เคียงกับการสูญเสียเชิงวิถีสูงกว่าตำแหน่งที่ระยะห่างระยะไกล เนื่องจากการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้าทำให้เกิดการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับผนังหม้อแปลงไฟฟ้าจากหลายทิศทาง ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนอาจส่งเสริมกันหรือหักล้างกันทำให้สามารถคาดการณ์การสูญเสียเชิงวิถีได้ยาก เมื่อพิจารณารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่าง ๆ จะสังเกตได้ว่า ณ ตำแหน่ง $Tx1$ และ $Tx3$ เป็นด้านส่งจะมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใกล้เคียงกัน เนื่องจากเป็นตำแหน่งด้านส่งที่อยู่ใกล้กับผนังด้านข้างของหม้อแปลงทั้ง 2 ตำแหน่งในทางกลับกัน ณ ตำแหน่ง $Tx2$ เป็นด้านส่งจะมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแตกต่างกับอีก 2 ตำแหน่ง

5.4.3 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองของการสูญเสียเชิงวิถีทั้งในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและกรณีมีสิ่งกีดขวางโดยเปรียบเทียบระหว่างการไม่ใช้วงจรกรองแบบแมตซ์และใช้วงจรกรองแบบแมตซ์ ทำให้ทราบถึงคุณลักษณะของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อพิจารณากรณีไม่มีสิ่งกีดขวางจะสังเกตได้ว่า ณ ระดับชั้นกลางจะมีระดับการสูญเสียเชิงวิถีเฉลี่ยต่ำกว่าที่ระดับอื่น และจะสังเกตได้ว่า ณ ตำแหน่ง $Tx2$ เป็นสายอากาศส่งจะมีระดับการสูญเสียเชิงวิถีเฉลี่ยต่ำกว่า ณ ตำแหน่ง $Tx1$ และ $Tx3$ เนื่องจากได้รับผลกระทบจากการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากผนังหม้อแปลงไฟฟ้าน้อยกว่า และเมื่อพิจารณากรณีที่มีสิ่งกีดขวางจะสังเกตได้ว่าระดับการสูญเสียเชิงวิถี ณ ระดับชั้นกลางและล่าง จะมีระดับสูงกว่าระดับชั้นบน อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากได้รับผลกระทบจากการบดบังของสิ่งกีดขวางซึ่งใส่เข้าไปตรงกลางของตัวหม้อแปลงไฟฟ้า อย่างไรก็ตามจะสังเกตได้ว่าเมื่อใส่สิ่งกีดขวางเข้าไปในหม้อแปลงไฟฟ้าจะส่งผลต่อการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างเห็นได้ชัด

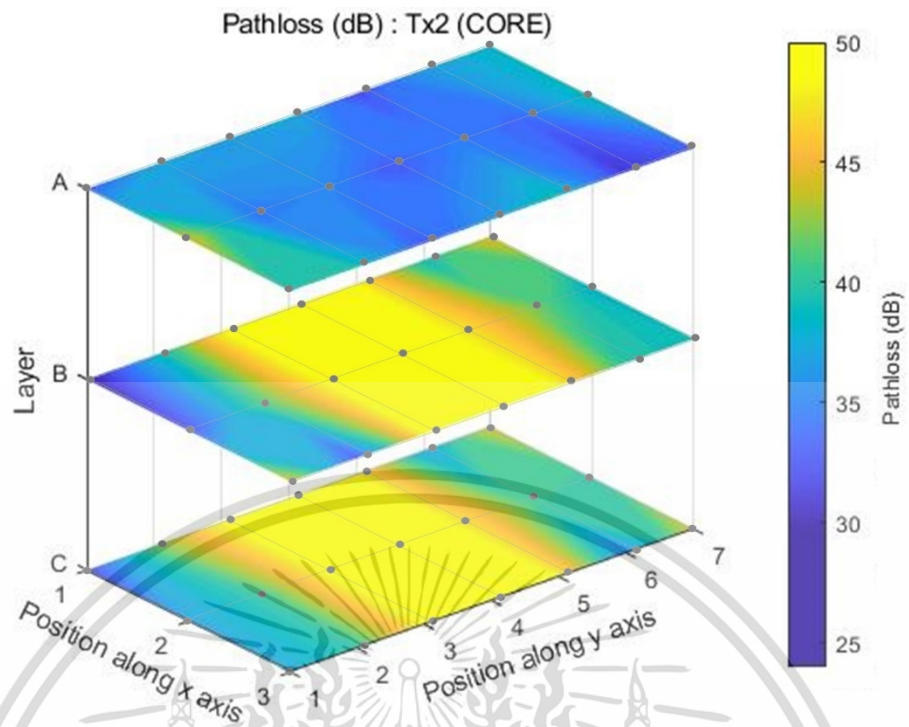


(ก) ไม่ใช้วงจรกรองแบบแมตช์

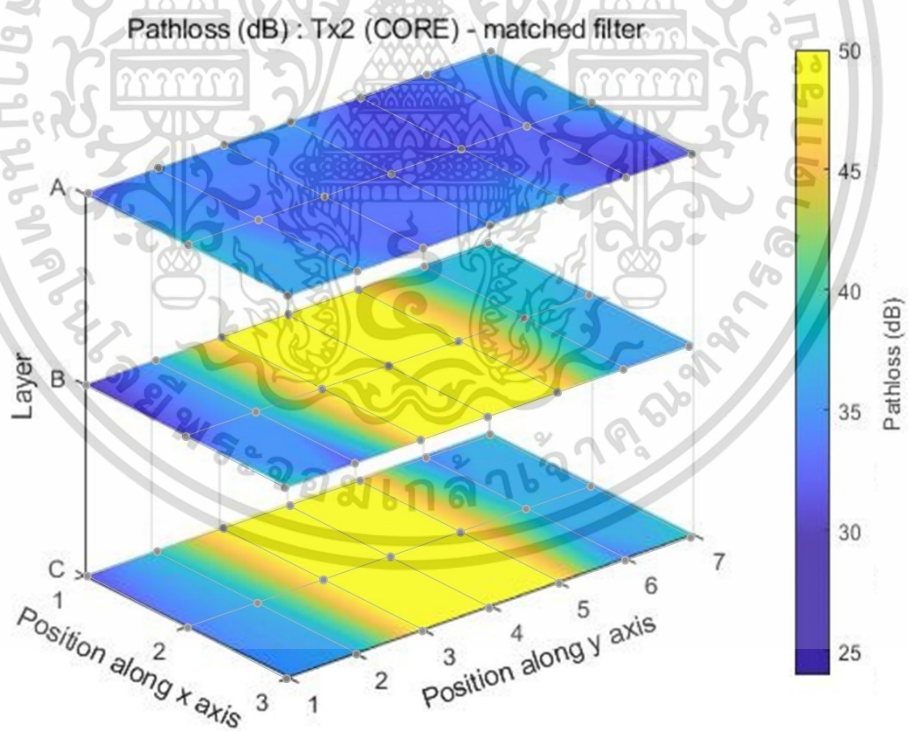


(ข) ใช้วงจรกรองแบบแมตช์

รูปที่ 5.16 ตัวอย่างการเปรียบเทียบการสูญเสียเชิงวิถึระหว่างไม่ใช้วงจรกรองแบบแมตช์และใช้วงจรกรองแบบแมตช์โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx2 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



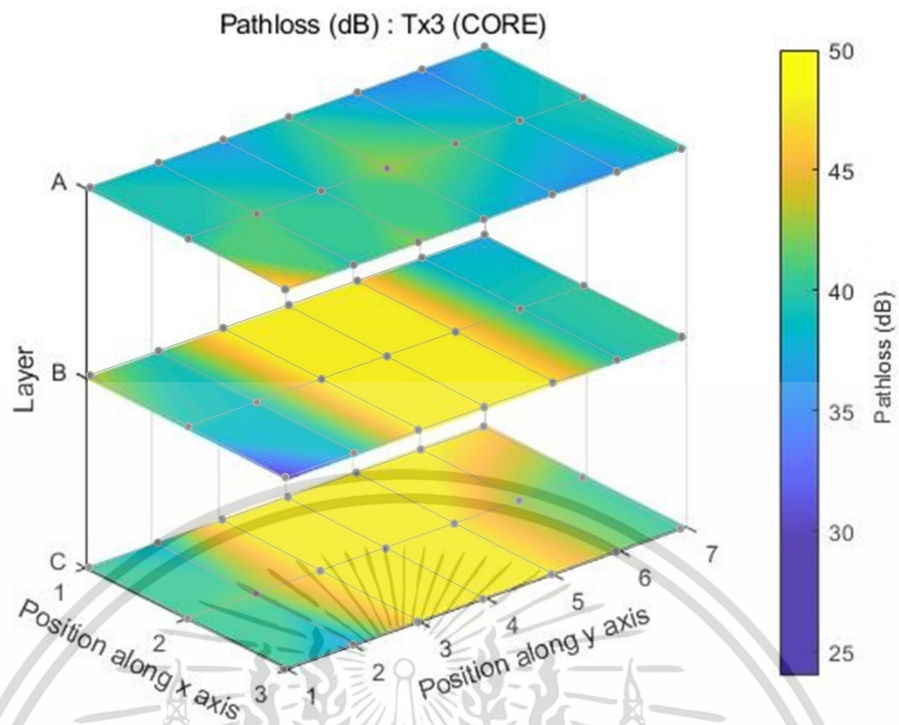
(ก) ไม่ใช้วงจรกรองแบบแมตช์



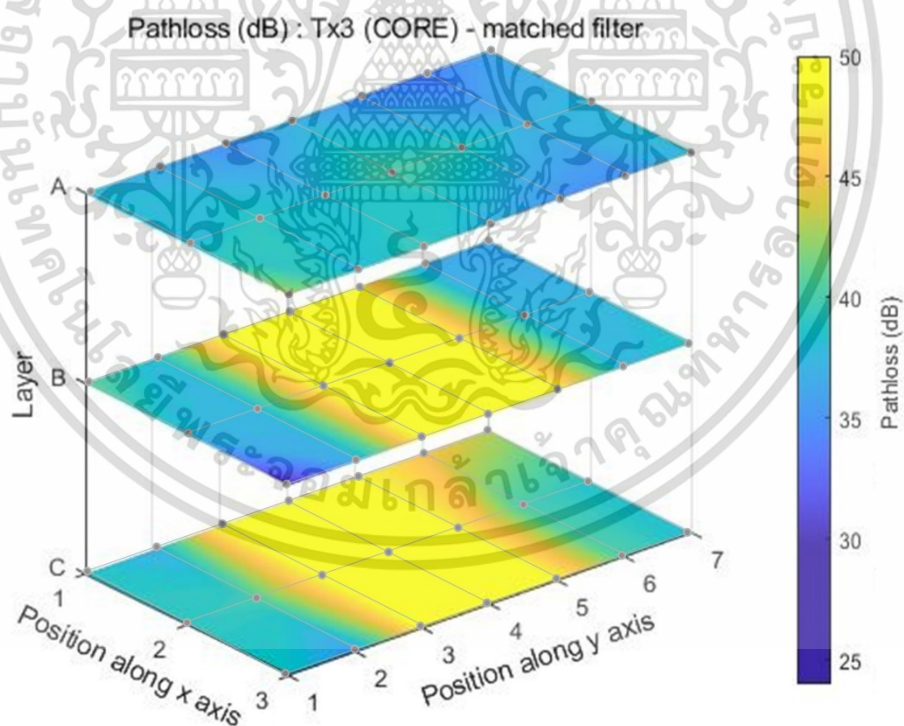
(ข) ใช้วงจรกรองแบบแมตช์

รูปที่ 5.17 ตัวอย่างการเปรียบเทียบการสูญเสียเชิงวิถึระหว่างไม่ใช้วงจรกรองแบบแมตช์และใช้วงจรกรองแบบแมตช์โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx2 เป็นต้นส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ไม่ใช้วงจรกรองแบบแมตช์



(ข) ใช้วงจรกรองแบบแมตช์

รูปที่ 5.18 ตัวอย่างการเปรียบเทียบการสูญเสียเชิงวิถีระหว่างไม่ใช้วงจรกรองแบบแมตช์และใช้วงจรกรองแบบแมตช์โดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 สรุป

บทนี้ได้อธิบายถึงผลการทดลองวิจัย การวิเคราะห์และการประเมินผลเปรียบเทียบที่ได้จากการวัดจริงตามแบบแผนการประเมินผลที่นำเสนอในบทที่ 3 และขั้นตอนการทดลองที่แสดงในบทที่ 4 เห็นได้ว่าในบทนี้ได้แสดงผลการทดลองวิจัยแสดงให้เห็นถึงลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้าในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง โดยได้พิจารณาจากขนาดและเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอน ภาพตัดขวางการประวิงกำลังงาน การสูญเสียเชิงวิถี และแสดงการเปรียบเทียบทำให้เห็นถึงคุณลักษณะช่องสัญญาณที่เกิดการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างรุนแรงภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ทำให้เกิดการหักล้างของสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อย่างไรก็ตามผลการทดลองวิจัย ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณและรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงได้เป็นไปตามวัตถุประสงค์อย่างครบถ้วน และทำให้ได้รับความรู้ความเข้าใจในการออกแบบวัสดุอุปกรณ์ในหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อตรวจหาการเกิดดิสตอร์จภายในหม้อแปลงไฟฟ้าได้ในอนาคต

บทที่ 6

สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 กล่าวนำ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอแบบแผนการประเมินผลการทดลองวิจัยของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ตามข้อกำหนดมาตรฐาน IEC/TS 62478 และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการดิสซาร์จบางส่วน ออกแบบจำลองและการประเมินผลการทดลองจริงเพื่อประยุกต์ใช้ในการตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้าบนพื้นฐานของสูตรการส่งผ่านของฟรีสและการประยุกต์ใช้สูตรของฟรีสให้มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วน นำเสนอการใช้วงจรกรองแบบแมตซ์ที่ด้านรับเพื่อปรับปรุงคุณภาพสัญญาณให้เหมาะสมที่สุด นำเสนอสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปที่มีความถี่ 2.4 จิกะเฮิร์ตซ์สำหรับใช้เป็นสายอากาศด้านส่งและด้านรับ นำเสนอวิธีการปรับเทียบสายอากาศที่สร้างขึ้นเพื่อหาสายอากาศที่มีประสิทธิภาพในการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีที่สุด โดยวิเคราะห์และประเมินผลเปรียบเทียบของฟังก์ชันการส่งผ่านการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่มีสิ่งกีดขวางและไม่มีสิ่งกีดขวาง จากการพิจารณคุณลักษณะฟังก์ชันถ่ายโอนช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ภาพตัดขวางการประวิงกำลังงาน และการสูญเสียเชิงวิถี ในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง

6.2 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองของฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้าระหว่างกรณีที่ไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวางในบทที่ 5 โดยพิจารณาจากขนาดและเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้าการพิจารณากรณีไม่มีสิ่งกีดขวางพบว่าขนาดและเฟสโดยพิจารณา ณ ตำแหน่ง Tx1 Tx2 และ Tx3 เป็นด้านส่งมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญ โดยมีขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนสูงสุดเท่ากับ -20 dB แต่อย่างไรก็ตามจะสังเกตได้ว่าในบางความถี่จะมีขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเป็นผลจากการสะท้อนภายในหม้อแปลงไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และในช่วงความถี่ที่ขนาดมีค่าลดลงจะมีเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนไม่เป็นเชิงเส้นเช่นเดียวกัน ทำให้เห็นถึงความสอดคล้องกันระหว่างขนาดและเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนได้เป็นอย่างดี เมื่อพิจารณากรณีที่มีสิ่งกีดขวางพบว่าสิ่งกีดขวางส่งผลกระทบต่อช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างมีนัยยะสำคัญสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนจากขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนที่กรณีมีสิ่งกีดขวางจะมีขนาดสูงสุดเท่ากับ -28 (ลดลง 8 dB) ดังที่แสดงในตารางที่ 6.1 และ ณ ตำแหน่ง Rx2 และ Rx3 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ระดับความสูงของสายอากาศรับอยู่บริเวณตรงกลางและด้านล่างของหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีขนาดของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันถ่ายโอนลดลงและเฟสไม่เป็นเชิงเส้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากถูกบดบังจากสิ่งกีดขวาง นอกจากนี้การมีสิ่งกีดขวางยังส่งผลกระทบต่อช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ภายในหม้อแปลงไฟฟ้าโดยทำให้ค่าเฉลี่ยของขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนมีค่าลดลง เนื่องจากสิ่งกีดขวางในหม้อแปลงไฟฟ้าทำให้การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงไป

เมื่อพิจารณาผลการทดลองของภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณที่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์กรณีนี่ไม่มีสิ่งกีดขวางและกรณีมีสิ่งกีดขวาง ทำให้สามารถทำการพิจารณาระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ในเวลาประวิงเดียวกันได้ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางจะสังเกตได้ว่า ณ ตำแหน่ง Rx2 เป็นต้นรับจะมีระดับกำลังงานสูงกว่าที่ตำแหน่ง Rx1 และ Rx3 อย่างมีนัยยะสำคัญ เนื่องจากมีระดับความสูงเท่ากับสายอากาศส่ง โดยมีระดับกำลังงานสูงสุดเท่ากับ 4.7 มิลลิวัตต์ และกรณีมีสิ่งกีดขวางจะสังเกตได้ว่า ณ ตำแหน่ง Rx1 เป็นต้นรับจะมีระดับกำลังงานสูงกว่าที่ตำแหน่ง Rx2 และ Rx3 อย่างมีนัยยะสำคัญ เนื่องจากมีการบดบังและการสะท้อนของสิ่งกีดขวางภายในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยมีระดับกำลังงานสูงสุดเท่ากับ 1.52 มิลลิวัตต์ ดังที่แสดงในตารางที่ 6.1 ผลการทดลองของภาพตัดข้างการประวิงกำลังงานทำให้สามารถเข้าใจถึงคุณลักษณะของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าได้และสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการหาการดิสซาร์จบางส่วนได้โดยพิจารณาจากเปรียบเทียบระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้กับระดับกำลังงานของสัญญาณที่รับได้ที่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในหม้อแปลงไฟฟ้า หากมีระดับกำลังงานของสัญญาณปรากฏขึ้น ณ เวลาที่แตกต่างจากสัญญาณที่ผ่านวงจรกรองแบบแมตซ์ จะสามารถสันนิษฐานได้ว่าอาจจะมีการดิสซาร์จบางส่วนเกิดขึ้น

และจากผลการสูญเสียเชิงวิถีทั้งในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและกรณีมีสิ่งกีดขวาง ทำให้ทราบถึงคุณลักษณะของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในหม้อแปลงไฟฟ้า และทำการเปรียบเทียบระหว่างการใช้วงจรกรองแบบแมตซ์และใช้วงจรกรองแบบแมตซ์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางจะสังเกตได้ว่า ณ ระดับชั้นกลางจะมีระดับการสูญเสียเชิงวิถีเฉลี่ยต่ำกว่าที่ระดับอื่น โดยมีการสูญเสียเชิงวิถีเฉลี่ยเท่ากับ 38 dB และจะสังเกตได้ว่าตำแหน่งของสายอากาศส่งมีผลต่อมีระดับการสูญเสียเชิงวิถี เนื่องจากการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากผนังหม้อแปลงไฟฟ้า และเมื่อพิจารณากรณีที่มีสิ่งกีดขวางจะสังเกตได้ว่าระดับการสูญเสียเชิงวิถี ณ ระดับชั้นกลางและล่าง จะมีระดับสูงกว่าระดับชั้นบนอย่างมีนัยยะสำคัญ โดยมีการสูญเสียเชิงวิถีเฉลี่ยเท่ากับ 42 dB ดังที่แสดงในตารางที่ 6.1 เนื่องจากได้รับผลกระทบจากการบดบังของสิ่งกีดขวางซึ่งใส่เข้าไปตรงกลางของตัวหม้อแปลงไฟฟ้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำให้ทราบคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถนำไปพัฒนาเซนเซอร์หรือสายอากาศที่เหมาะสม การวางตำแหน่งของเซนเซอร์ และวิธีการประเมินผลวิเคราะห์ในการตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วนได้ โดยการพิจารณาจากภาพตัดข้างการประวิงกำลังงาน และมีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการพัฒนาการตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วนด้วย

วิธีแม่เหล็กไฟฟ้า และสามารถใช้เป็นทฤษฎีอ้างอิงในการศึกษาวิจัยในอนาคตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1 การเปรียบเทียบผลการทดลองวิจัยระหว่างกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและกรณีมีสิ่งกีดขวาง

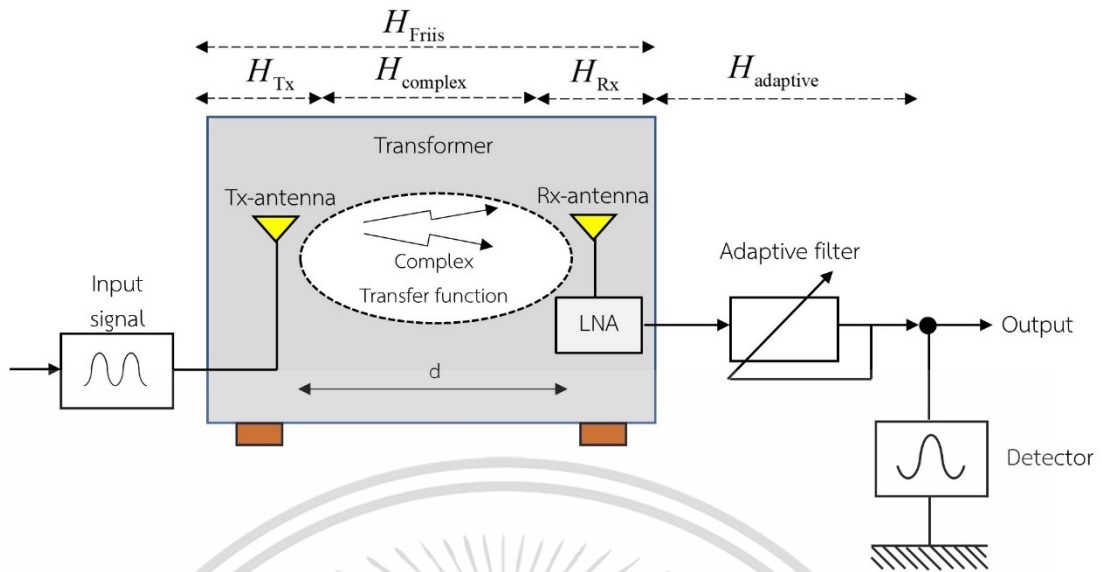
| พารามิเตอร์ | ไม่มีสิ่งกีดขวาง | มีสิ่งกีดขวาง |
|-----------------------------|------------------|-----------------|
| ขนาด (สูงสุด) | - 20 dB | -28 dB |
| เฟส | เชิงเส้นบางส่วน | เชิงเส้นบางส่วน |
| ภาพตัดขวางการประวิงกำลังงาน | 5 mW | 0.8 mW |
| การสูญเสียเชิงวิถี | 38 dB | 42 dB |

6.3 ข้อเสนอแนะ

จากมาตรฐาน IEC/TS 62478 ได้กำหนดให้สามารถใช้ช่วงความถี่สูง ความถี่สูงมากและความถี่สูงยิ่ง ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ถึง 3 จิกะเฮิร์ตซ์ในการตรวจการดิสซาร์จบางส่วนด้วยวิธีทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้ และวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาโดยเลือกใช้ความถี่ 2.4 จิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นความถี่ในช่วงความถี่สูงยิ่งและเป็นช่วงความถี่ ISM Band ที่สามารถใช้ในการศึกษาวิจัยได้โดยไม่ต้องมีใบอนุญาตจึงมีความเหมาะสมที่จะศึกษาวิจัยโดยใช้ความถี่ดังกล่าว แต่อย่างไรก็ตามความถี่เป็นความถี่ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายจากหลากหลายเทคโนโลยี ทำให้ในการทดลองวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้ามีการรบกวนจากสัญญาณภายนอกอยู่เล็กน้อย สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอเฉพาะแบบแผนการประเมินผลการทดลองของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้า พิจารณาที่ความถี่ 2.4 จิกะเฮิร์ตซ์เท่านั้น เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับใช้เป็นตัวอย่างในการวิเคราะห์ตามแบบแผนที่ได้นำเสนอ โดยที่สามารถที่จะพิจารณาใช้ความถี่อื่นที่ระบุในมาตรฐาน IEC/TS 62478 ในการศึกษาวิจัยในอนาคตต่อไปได้

6.4 การวิจัยในอนาคต

ในอนาคตสามารถทำการวิเคราะห์โดยใช้อัลกอรึทึมอื่น ๆ เช่น adaptive filter, time gating, SAGE algorithm, CLEAN algorithm เป็นต้น ดังที่แสดงในรูปที่ 6.1 รวมถึงออกแบบการทดลองโดยเปลี่ยนชนิดของสายอากาศให้มีช่วงความถี่หรือแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่หลากหลาย รวมถึงตำแหน่งการวัดให้มีความหลากหลายและละเอียดมากขึ้น



รูปที่ 6.1 แผนภาพบล็อกของแบบจำลองฟังก์ชันการถ่ายโอนในหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการตรวจหาการดิสรจางบางส่วน โดยเลือกใช่วงจรกรองแบบปรับค่าได้ (Adaptive filter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. I. Bin Md Kahmi. "Effect of thermal stress on partial discharge characteristics of oil impregnated pressboard." A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, 2018.
- [2] Partial discharge measurement 3rd Edition, IEC Standard 60270, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2000.
- [3] High-Voltage On-site Testing with Partial Discharge Measurement, Cigré Technical brochure WG D1.33. Task Force 05. 502, Conseil International des Grands Réseaux Électriques, Paris, France, June 2012
- [4] High voltage test techniques – Measurement of partial discharge by electromagnetic and acoustic methods, IEC/TS Standard 62478, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2016.
- [5] IEEE Recommended Practice for Partial Discharge Measurements under AC Voltage with VHF/UHF Sensors during Routine Tests on Factory and Pre-Molded Joints of HVDC Extruded Cable Systems up to 800 kV, IEEE Std 2862-2020, pp.1-31, 8 March 2021.
- [6] S. Boonpoke. "Development of Partial Discharges Pattern Recognition Systems by Using Artificial Intelligence Techniques." A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, 2010.
- [7] R. Haller, S. Kornhuber, M. Muhr, N. Pattanadech, Partial Discharges (PD): Detection, Identification and Localization. Wiley-IEEE Press, 2023.
- [8] Radio Regulations, R-REG-RR-2020, International Telecommunications Union, Geneva, Switzerland, 2020.
- [9] L. Niemeyer, "A generalized approach to partial discharge modeling," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 2, no. 4, pp. 510-528, Aug. 1995.
- [10] R. Bartnikas, "Partial discharges. Their mechanism, detection and measurement," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 9, no. 5, pp. 763-808, Oct. 2002.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [11] G. C. Stone, "Partial discharge diagnostics and electrical equipment insulation condition assessment," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 12, no. 5, pp. 891-904, Oct. 2005.
- [12] A. Abu-Siada, Eds. Power Transformer Condition Monitoring and Diagnosis, Hertfordshire, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 2018.
- [13] M. Duval, "A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers," in IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 18, no. 3, pp. 8-17, May-June 2002.
- [14] K. Wu et al., "Study on the characteristics of partial discharges in voids under square voltage by detecting light emission intensity," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 18, no. 5, pp. 1651-1657, October 2011.
- [15] T. Boczar and D. Zmarzly, "Application of wavelet analysis to acoustic emission pulses generated by partial discharges," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 11, no. 3, pp. 433-449, June 2004.
- [16] T. Boczar, S. Borucki, A. Cichon and D. Zmarzly, "Application Possibilities of Artificial Neural Networks for Recognizing Partial Discharges Measured by the Acoustic Emission Method," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 16, no. 1, pp. 214-223, February 2009.
- [17] Y. -B. Wang et al., "Acoustic localization of partial discharge sources in power transformers using a particle-swarm-optimization-route-searching algorithm," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 24, no. 6, pp. 3647-3656, Dec. 2017.
- [18] M. Hikita, S. Ohtsuka, T. Hoshino, S. Maruyama, G. Ueta and S. Okabe, "Propagation properties of PD-induced electromagnetic wave in GIS model tank with T branch structure," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 18, no. 1, pp. 256-263, February 2011.
- [19] S. Okabe, G. Ueta, H. Hama, T. Ito, M. Hikita and H. Okubo, "New aspects of UHF PD diagnostics on gas-insulated systems," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 21, no. 5, pp. 2245-2258, Oct. 2014.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [20] A. Darwish, S. S. Refaat, H. A. Toliyat and H. Abu-Rub, "On the Electromagnetic Wave Behavior Due to Partial Discharge in Gas Insulated Switchgears: State-of-Art Review," in IEEE Access, vol. 7, pp. 75822-75836, 2019.
- [21] K. Tikakosol, "Use of Acoustic Emission (AE) and High Frequency Current Transducer (HFCT) Sensor to Locate Partial Discharge and Arcing in High Voltage Switchgear" Master Thesis dissertation, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 2020.
- [22] S. M. Markalous, S. Tenbohlen and K. Feser, "Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 15, no. 6, pp. 1576-1583, December 2008.
- [23] S. Coenen, "Measurement of partial discharge in power transformers using electromagnetic signals" Ph.D. dissertation, University Stuttgart, Stuttgart, Germany, 2012.
- [24] M. Siegel, M. Beltle, S. Tenbohlen and S. Coenen, "Application of UHF sensors for PD measurement at power transformers," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 24, no. 1, pp. 331-339, Feb. 2017.
- [25] H. T. Friis, "A Note on a Simple Transmission Formula," in Proceedings of the IRE, vol. 34, no. 5, pp. 254-256, May 1946.
- [26] S. Promwong and J. Takada, "Free Space Link Budget Estimation Scheme For Ultra Wideband Impulse Radio With Imperfect Antennas," in IEICE Electronics Express, vol. 1, no. 7, pp. 188-192, 2004.
- [27] T. S. Rappaport, "Wireless Communications: Principles and Practice," 2nd ed. New Jersey: prentice hall PTR., 2002.
- [28] C. A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, 4th edition. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2016.
- [29] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, Antenna theory and design, 3rd edition. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [30] Agilent Technologies. E5061B ENA Series Network Analyzer.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [31] S. Ishigami, H. Iida and T. Iwasaki, "Measurements of complex antenna factor by the near-field 3-antenna method," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 38, no. 3, pp. 424-432, Aug. 1996.
- [32] S. Promwong, "Quantitative Evaluation of Waveform Distortion Due to Antenna in Ultra Wideband Impulse Radio" Ph.D. dissertation, Department of Communications and Integrated Systems, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, 2009.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ผลงานวิจัยที่ได้นำเสนอในระหว่างศึกษาระดับปริญญาเอก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

- [1] S. Promwong and T. Tiengthong, "Evaluation of UHF Transfer Function in a Power Transformer for Real-Time Partial Discharge Detection," Journal of Mobile Multimedia, Vol. 16, no. 1-2, pp. 65-84, 2020.

บทความที่ได้นำเสนอในการประชุมวิชาการนานาชาติ

- [1] T. Tiengthong, A. M. Jaya Marindra, N. Pattanadech and S. Promwong, "Characterization of Electromagnetic Wave Propagation in Transformer for PD Detection Analysis," 2022 8th International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST), pp. 79-82, 2022.
- [2] T. Tiengthong and S. Promwong, "A Study of Partial Discharge Localization in Transformer," 2019 16th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Pattaya, Thailand, pp. 333-336, 2019.

Editor-in-Chief: Pavlos Lazaridis

ISSN 1550-4646

Journal of Mobile Multimedia

JMM


River Publishers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Evaluation of UHF Transfer Function in a Power Transformer for Real-Time Partial Discharge Detection

Sathaporn Promwong* and Thanadol Tiengthong

*Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand*

E-mail: sathaporn.pr@kmitl.ac.th; 60601188@kmitl.ac.th

**Corresponding Author*

Received 30 April 2020; Accepted 31 May 2020;
Publication 17 August 2020

Abstract

The UHF transfer function is significant for a short-range communication system, e.g., a real-time diagnosis of partial discharge (PD). Real-time diagnosis of the PD has become a challenging topic of improving the diagnosis of high voltage equipment, including a power transformer. Further, the PD detection in high voltage equipment is critical since the PD can cause severe damage to electrical systems. The PD detection methods are classified by a phenomenon of the PD. The PD detection by electromagnetic (EM) method is regulated by IEC TS 62478, which specified the UHF band for the PD detection in power transformers. Hence, an evaluation of frequency characteristics is essential to achieve an excellent diagnostic performance. In this paper, a complex form of channel analysis is applied with the PD detection method. The measurement model in a power transformer is proposed. The optimum receiver is introduced to maximize SNR and hence it is easy to analyze the results. The results were analyzed by using magnitude, phase, group delay, received waveform, and path loss parameters. The results show that the measured channel is affected by the structure of the power transformer. The contribution of this research is useful for improving the precision of the PD detection with EM method and building an accurate real-time partial diagnosis via a smartphone or laptop computer.

Journal of Mobile Multimedia, Vol. 16_1-2, 65–84.

doi: 10.13052/jmm1550-4646.16124

© 2020 River Publishers

Keywords: UHF, complex form, UHF transfer function, Friis' transmission formula, partial discharge.

1 Introduction

Short-range multimedia technology and wireless communications have rapidly developed in recent years. It can apply to various applications, such as wireless sensors network and the internet of things (IoT) [1–3]. Ultra-high frequency (UHF) is usually used for video and sound broadcasting, mobile communications, Wi-Fi, and numerous kinds of applications [4]. The theory of wireless communications can be adapted to analyze the problems in the majority of the novel applications, e.g., wireless sensor networks, near-field communications, wireless access networks, field intensity in an inhomogeneous propagation environment [5–9], and wireless transformer condition diagnosis with electromagnetic method [10]. Partial discharge (PD) real-time diagnosis is one of the ways which can develop due to the benefit of the advanced investigation in wireless communications and partial diagnosis. Real-time diagnosis can help a maintenance operator to identify a problem without entering an actual site.

Further, the PD diagnosis is critical to avoid the undesired damage to a power system [11]. The PD may occur in various places, i.e., GIS, switchgear, and power transformer [12]. An antenna is used as a probe for the PD diagnosis to investigate the PD in the power transformer with an electromagnetic method [13]. The antenna's properties are taken into account to assess the antenna's performance so as to satisfy the condition of PD diagnosis in power transformers with the electromagnetic method. The minimum of interference in the sensor affects efficiency for short-range communication applications. It has attracted the majority of attention to investigate the sensor transfer function [14–20].

In the power transformer system, the PD and antennas are behaving like the pulse-shaping filter. The pulse shape of the transmission signal can be affected by the pulse shape distortion that is caused by any signal distortion in the frequency domain. Therefore, the complexity of the receiver mechanism will increase. A typical transformer is a request for a suitable structure, reasonable cost, and excellent performance. Hence, the design of the antenna for PD diagnosis in the transformer is one of the attractive challenges [13–20]. The Friis' transmission formula could not be directly used to diagnose the PD in the transformer, due to the signal's pulse shape, even though it is in line with sight. Therefore, the UHF signal waveform comparison is essential due to the Fresnel region of the antenna frequency response.

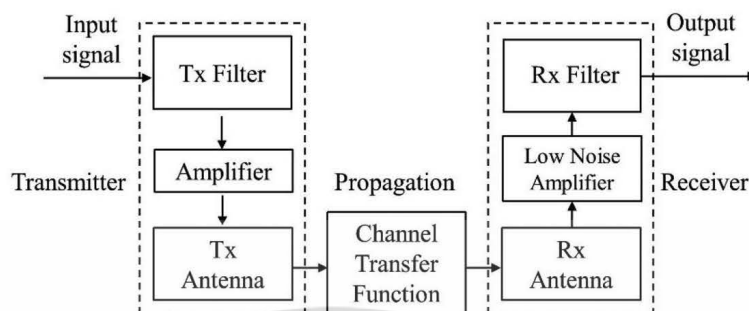


Figure 1 UHF communications system [4].

The antenna's properties are measured and discussed in this paper. The antenna transfer function in the Fresnel region is evaluated to investigate the PD propagation in the transformer. The modification of the Friis' transmission formula is introduced as the complex form equation for the PD diagnosis in the transformer. For this reason, the equivalent antenna gain had been derived. The transmission waveform and the optimum filter at the receiver are the primary modifications for the complex form of the Friis' transmission formula for the PD diagnosis in the transformer. The experiment had been done by using the UHF microstrip patch antenna for 2.2 GHz to 2.6 GHz band operation in the power transformer. The evaluation system in this paper is based on the UHF communications system, which is shown in Figure 1.

2 Partial Discharge

The PD is a phenomenon which occurs by the partial bridge of the electrical discharge between the insulation of the conductors. It can be observed in various high voltage equipment, e.g., the power transformer, GIS, and rotating machines. It is essential to understand the phenomenon of the PD since it can lead to power breakdown in power systems. The International Electrotechnical Commission (IEC) has regulated the PD definition in the IEC 60270:2000 standard [10]. The general descriptions and measuring systems have been documented. This activity is generally caused by the electrical stress concentration in the insulation of the electrical devices. The PD is related to the conditions of the insulation of the high voltage equipment, i.e., charge transportation, chemical reaction, light emission, sound release, and the radiation of electromagnetic waves.

According to different types of the conditions, the PD test methods of parts can be separate due to the circumstances [11], e.g., gas analysis for the chemical reaction, optical measurements for the light emission, the electrical measurement for the charge transport, the acoustic measurement for the sound release, and the electromagnetic measurement for the radiation of the electromagnetic wave. The PD test technique has been stated in the IEC standard, i.e., the IEC 60207:2000 for the PD measurement and the IEC TS 62478:2016 for the analysis of PDs by the electromagnetic and acoustic methods [12]. Following the IEC TS 62478:2016 standard, the short rise time of the PD pulse current is less than 1 ns. The pulse can be ranging from 3 MHz to 3 GHz. The advantages of the electromagnetic method are that it is better immune to disturb and noise, in determining a characteristic of the PD source, and in broad bandwidth. However, some disadvantages of the electromagnetic method, i.e., high equipment cost and the performance of this method, tend to rely on the physical structure of the sensors. There are various types of sensors available for detecting the PD pulse, for example, UHF antenna, disc- and cone-shaped sensors, field grading electrode, wave guide sensor, and directional electromagnetic couplers. The sensor output can indicate the importance of many parameters, e.g., transfer function, frequency characteristics, field magnitude dependence, and directional characteristics. The localization of the PD sensor is significant. The sensor can be installed inside the high voltage equipment. It should be installed as close as to the high voltage component area or the PD detection area.

The propagation mechanism easily influences the PD pulse characteristics effects such as diffraction, reflection, scattering, and attenuation. This interference is causing disturbances in the measurement of PDs with the electromagnetic method. Therefore, to decrease the interference from the ambient environment in the measurement of PDs, the analysis of the characteristic of the transfer function in the measuring environment is necessary.

3 Complex Form Analysis for the PD Detection in a Power Transformer

The Friis' transmission formula is the first to express in terms of power [21]. Then it is extended in terms of the transmission signal waveform to consider the transfer function [22–24]. It is assumed that the polarization of the transmitter antenna and receiver antenna match correctly. A block diagram of the PD UHF system for complex form analysis is shown in Figure 2.

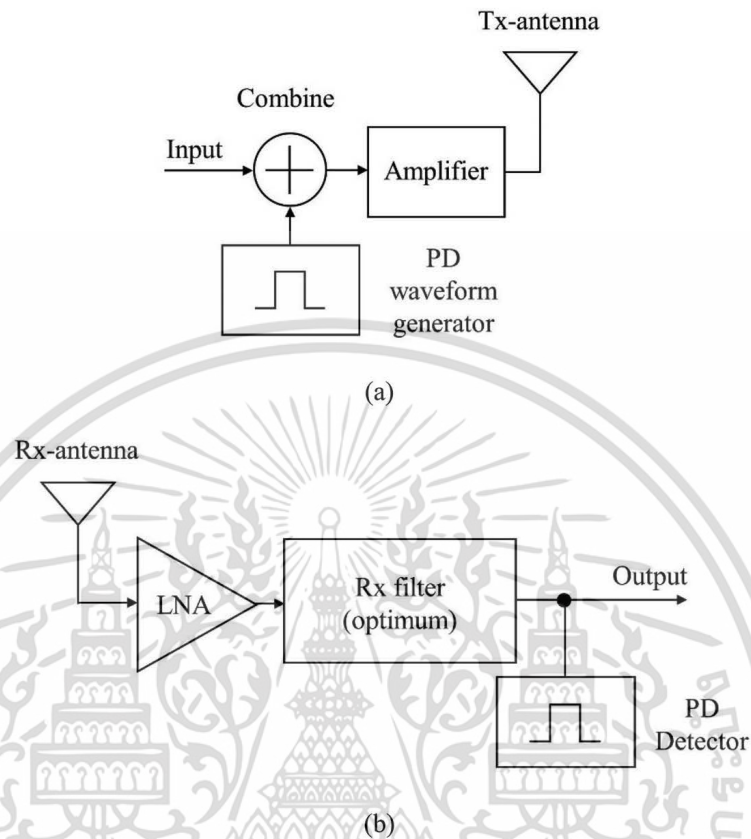


Figure 2 Block diagram of the PD UHF transceiver model: (a) PD UHF transmitter and (b) PD UHF receiver with optimum filter.

Equation (1) is the modification of the Friis' transmission formula. It includes three elements, namely the frequency characteristics of the antennas, the frequency characteristics of free space propagation, and the spectrum of the transmitted signal. The PD UHF channel corresponding transfer function $H_{\text{ch-corr}}(f, R)$ is

$$H_{\text{ch-corr}}(f, R) = H_f(f, R)H_r(f)H_t(f), \quad (1)$$

where $H_f(f, R)$ is the transfer function of the free space, $H_r(f)$ and $H_t(f)$ are the transfer functions of the transmitter (Tx) and the receiver (Rx) antennas. Furthermore, R is the transmitter antenna and receiver antenna (Tx -Rx) separation distance. The transfer function of the free space can be written as

$$H_f(f, R) = \frac{c}{4\pi|f|R} \exp(-jkR), \quad (2)$$

70 *S. Promwong and T. Tiengthong*

which is the free space transfer function where

$$k = \frac{2\pi f}{c} \quad (3)$$

where k is the propagation constant, c is the speed of propagation, and f is the operating frequency. The received waveform $v_r(t, R)$ can be found by using

$$v_r(t, R) = v_t(t) \otimes h_{\text{ch-corr}}(t, R), \quad (4)$$

where $v_t(t)$ is the transmitted signal waveform, \otimes is the convolution operator, and $h_{\text{ch-corr}}(t, R)$ is the impulse response of the modification of the Friis' transmission formula defined as

$$h_{\text{ch-corr}}(t, R) = F^{-1}\{H_{\text{ch-corr}}(f, R)\}, \quad (5)$$

where $F^{-1}\{\cdot\}$ is the inverse Fourier transform (IFFT). The receiver spectrum density $V_r(f)$ is presented as

$$V_r(f) = V_t(f)H_{\text{ch-corr}}(f), \quad (6)$$

where the spectrum density of the transmission waveform is $V_t(f)$.

3.1 Optimum receiver

The transfer function of the UHF channel measurement with the optimum receiver filter is $H_{\text{opt}}(f)$. The optimum filter has been introduced in the system to maximize the signal-to-noise ratio (SNR) of the receiver, as shown in Eq. (7)

$$H_{\text{opt}}(f) = \frac{H_{\text{ch-corr}}^*(f)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_{\text{ch-corr}}^*|^2 df}}, \quad (7)$$

and for the prediction case

$$H_{\text{opt,p}}(f) = \frac{H_{\text{ch-corr,p}}^*(f)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_{\text{ch-corr,p}}^*|^2 df}}, \quad (8)$$

which satisfies the following constant noise output power condition

$$\int_{-\infty}^{\infty} |H_{\text{ch-corr}}(f)|^2 df = 1. \quad (9)$$

The output waveform and the spectrum of the receiver output are $h_{\text{ch-corr}}(t, R)$ and $H_{\text{ch-corr}}(f, R)$, respectively. For the spectrum of the output from the optimum filter $V_{\text{opt}}(f)$

$$\begin{aligned} V_{\text{opt}}(f) &= H_{\text{ch-corr}}(f)H_{\text{opt}}(f) \\ &= \frac{|H_{\text{ch-corr}}(f)|^2}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_{\text{ch-corr}}(f)|^2 df}}, \end{aligned} \quad (10)$$

and the waveform of the output from the optimum filter $\nu_{\text{opt}}(t)$ is

$$\begin{aligned} \nu_{\text{opt}}(t) &= h_{\text{ch-corr}}(t) \otimes h_{\text{opt}}(t) \\ &= \frac{h_{\text{ch-corr}}(t) \otimes h_{\text{opt}}(-t)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} h_{\text{ch-corr}}^2(t) dt}}, \end{aligned} \quad (11)$$

and the prediction case

$$\begin{aligned} \nu_{\text{opt,p}}(t) &= h_{\text{ch-corr,p}}(t) \otimes h_{\text{opt,p}}(t) \\ &= \frac{h_{\text{ch-corr,p}}(t) \otimes h_{\text{opt,p}}(-t)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} h_{\text{ch-corr,p}}^2(t) dt}}, \end{aligned} \quad (12)$$

and finally, we get the maximum as

$$\begin{aligned} \max \nu_{\text{opt}}(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} V_{\text{opt}}(f) df \\ &= \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_{\text{ch-corr}}(f)|^2 df}. \end{aligned} \quad (13)$$

The path loss $PL_{\text{UHF}}[\text{dB}]$ can be calculated from the obtained transmitted waveform and received waveform. It can be defined in decibels as the ratio between the maximum amplitude of the transmitted waveform and the maximum amplitude of the received waveform as

$$PL_{\text{UHF}}[\text{dB}] = 10 \log \left(\frac{|\nu_{\text{T}}(t)|}{|\nu_{\text{r}}(t)|} \right)^2. \quad (14)$$

4 Measurement System Model

To investigate the complex form of in the power transformer with measured transfer function in this paper, the measurement system model had been

provided such that a measurement procedure is divided into two cases. The first case will measure the complex transfer function in the power transformer at different heights of the transmitter (Tx) antenna and receiver (Rx) antenna. Moreover, an analysis is carried out by using the compare magnitude, phase, group delay, and path loss with different antenna heights at 5 cm, 20 cm, 40 cm, 60 cm, and 80 cm. The second case will measure the transfer function in power transformers at different Tx – Rx separation distances. It ranges from 0.05 m to 1.05 m. It analyzes by using the compares of the received waveform and path loss with different antenna separation distances.

The vector network analyzer (VNA) is used to measure and collect the data, where the transmitter antenna is connected to port-1 and the receiver antenna is connected to port-2 of the VNA. The UHF microstrip patch antenna is considered for use in the experiment due to the property of the antenna, which can operate in a wide bandwidth. The measurement had been done in the power transformer with different Tx – Rx antenna heights and distances. The setup of the experimental model is presented in Figure 3. It should be noted that the calibration at connectors and transmission cables had done before initiating the measurement to reduce interference from noise in connectors and transmission cables. In the experiment, the varying separation distance is chosen to determine the accuracy of the transfer function at different reference separation distances. The experimental parameters are shown in Table 1.

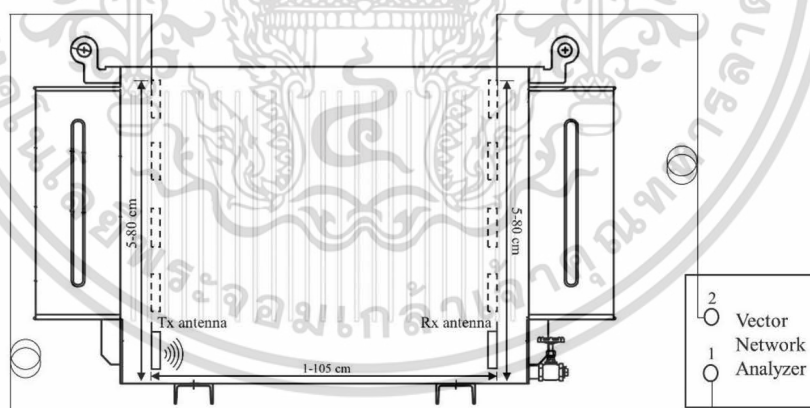
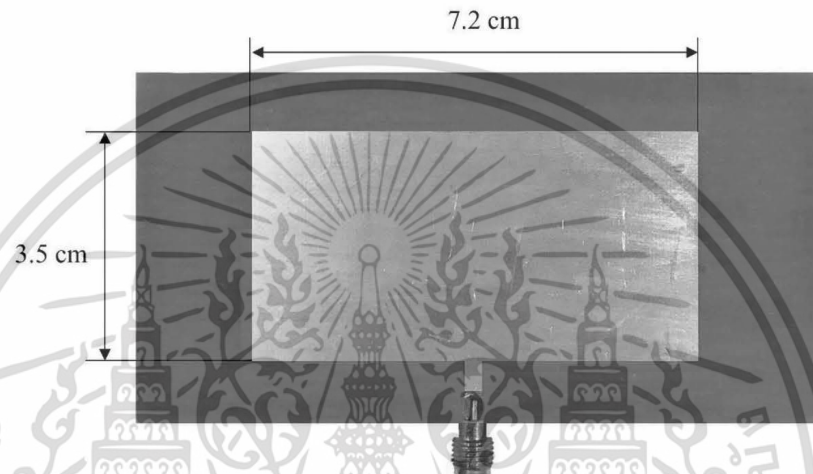


Figure 3 Experimental setup in the power transformer.

Table 1 Example parameters of experiments

| Parameters | Values |
|----------------------------|--------------------------------------|
| Frequency range | 2.2 GHz to 2.6 GHz |
| Frequency points | 801 points |
| Tx – Rx antennas type | UHF microstrip patch antenna |
| Tx – Rx antennas height | 5 cm, 20 cm, 40 cm, 60 cm, and 80 cm |
| Tx – Rx separate distances | 0.01 m to 1.05 m |

**Figure 4** Geometry and dimension of the UHF microstrip patch antenna [26].

4.1 UHF microstrip patch antenna

The Fresnel region of the UHF microstrip patch antenna in this paper is determined from the antenna's largest dimension for both the transmitter antenna and receiver antenna. The largest dimension of both the transmitter antenna and receiver antenna, as shown in Figure 4, is 8 cm which is considered as the largest dimension of the antenna. The far-field region of the antenna is 40.96 cm, and the far-field can be calculated by Eq. (15) [25]

$$R_{\text{far}} \geq \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (15)$$

where

R_{far} is the far-field region,
 λ is the wavelength (m),

74 *S. Promwong and T. Tiengthong*

and D is the largest dimension of the antennas which can be calculated by Eq. (16)

$$D = D_{Tx} + D_{Rx}, \quad (16)$$

where

D_{Tx} is the largest dimension of the transmitter antenna (m) and
 D_{Rx} is the largest dimension of a receiver antenna (m).

4.2 Transmission waveform for the UHF PD

This paper considered using the rectangular passband for the signal bandwidth used in the UHF frequency range, i.e., 2.2 GHz to 2.6 GHz. The waveform distortion significantly increases when the bandwidth is larger. The transmitted waveform is presented as

$$v_t(t) = \frac{A}{BW} [f_{\max} \sin c(2\pi f_{\max} t) - f_{\min} \sin c(2\pi f_{\min} t)], \quad (17)$$

$$V_t(f) = \begin{cases} 1/2BW & ||f| - f_c| \leq BW/2 \\ 0 & ||f| - f_c| > BW/2 \end{cases}, \quad (18)$$

where the minimum frequency (f_{\min}) is 2.2 GHz and the maximum frequency (f_{\max}) is 2.6 GHz. The occupied bandwidth is BW, the amplitude is A , the operating frequency is f , and the center frequency is f_c . The transmitted waveform and spectrum density of the transmitted waveform are shown in Figure 5.

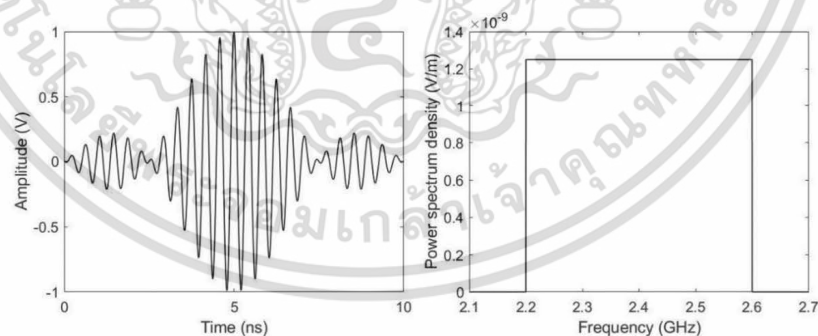


Figure 5 Example transmitted waveform and power spectrum density of UHF systems.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5 Results and Discussions

The measurement of the transfer function in the power transformer was done according to the proposed measurement model, as presented in Section 4. This research was done by dividing a measurement into two cases. The first case is to present the comparison of magnitude, phase, group delay, and path loss between different Tx – Rx antennas' height. The second case is to present a comparison of received waveform and path loss between different Tx – Rx antennas' separation distance. From the results, we can show the different characteristics of the measured transfer function, which we will discuss further.

The channel transfer function of complex form in the power transformer can be easily analyzed using a magnitude. Figure 6 shows the comparison of the magnitude at different Tx – Rx antennas' height, i.e., 5 cm, 20 cm, 40 cm, 60 cm, and 80 cm. A solid black line, black-dashed line, black-dotted line, black dash-dot line, and the solid gray line represent the magnitude of each antenna's height, respectively. The results at 5 cm of the antenna's height show that it has a better magnitude than the other heights of the antenna. The magnitudes of 20 cm, 40 cm, 60 cm, and 80 cm antenna height are similar. However, the magnitude of the 80 cm antenna height is lower than the other antenna height. Besides, many low magnitudes occur due to the structure of the power transformer and noise from the environment.

In Figure 7, a comparison of phase from the Tx – Rx antennas channel transfer function at different antenna heights is provided. The results are presenting by using different types of lines as same as in Figure 6. The phase of 5 cm antenna height is better and has more linearity than other antenna

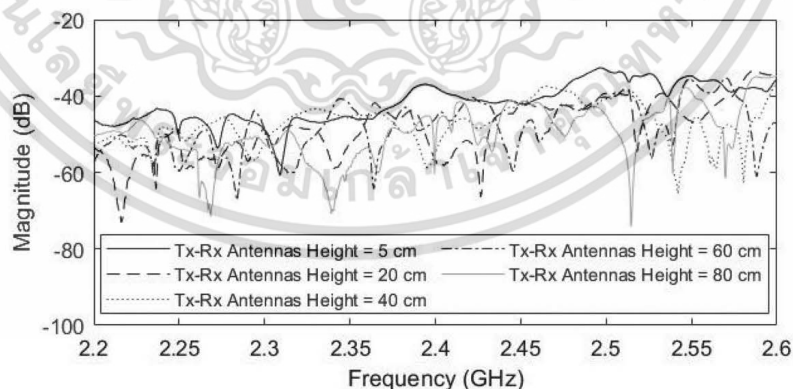


Figure 6 The comparison of magnitude between different Tx – Rx antennas height.

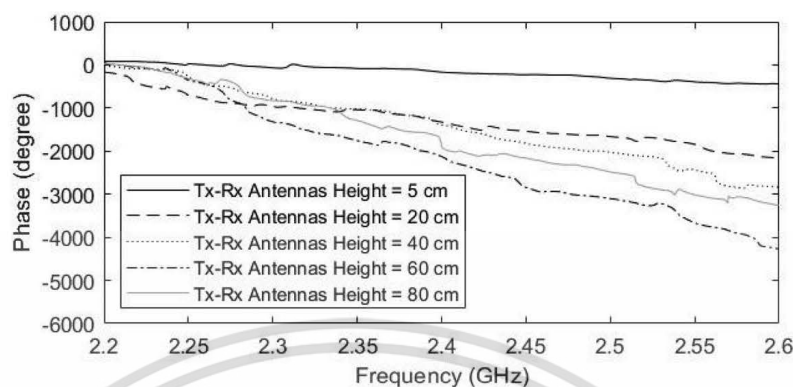


Figure 7 The comparison of phase between different Tx – Rx antennas height.

heights. The phase of the antenna is performed in the same direction at the antenna heights of 20 cm, 40 cm, 60 cm, and 80 cm. However, the phases of 20 cm and 60 cm antenna heights have some error due to the noise from the environment. It made the phase of 20 cm antenna height more phase changing in a lower frequency. The phase of 60 cm antenna height has the lowest phase of channel transfer function compared to other antenna heights.

Group delay is another parameter used in the investigation of complex form analysis with measured transfer function. It is advantageous to present a time distortion and then calculating by differentiating the concerned frequency. In Figure 8, the comparison of the group delay of the measured channel transfer function at different antenna heights is presented. From the results, we now discuss the group delay trends. The group delay of 0 cm antenna height has the lowest delay. The group delay of 80 cm antenna height has the highest delay. The group delay results had shown good agreement with the phase results. Further, some frequencies had high delay due to the noise, the reflection of the waveform, the structure of the power transformer, and the environment.

Figure 9 compares the received waveform between the optimum case and the prediction case of the channel transfer function with a different separation distance of the Tx – Rx antennas. The optimum case is calculated using the measurement data with Eq. (13). The prediction case is calculated by using Eq. (12). The received waveform of prediction and measurement is presented by the black dashed line and solid black line, respectively. The difference between optimum and prediction cases can be presented with the effect of the Fresnel region. In Figure 9(a), the received waveform at 0.3 m distance is presented. It shows a difference in the optimum case and prediction case. At

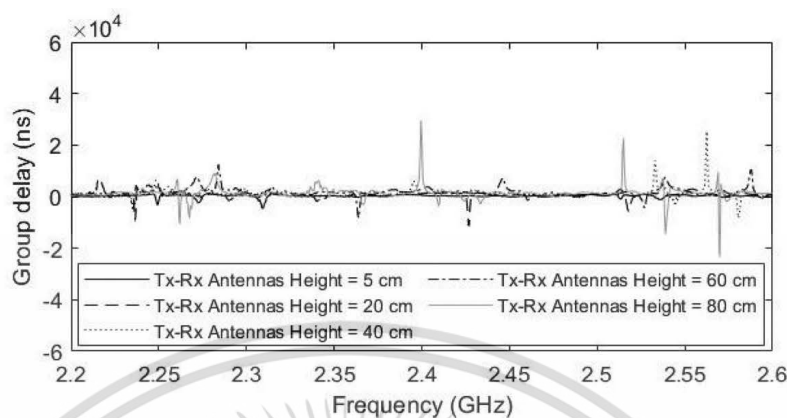
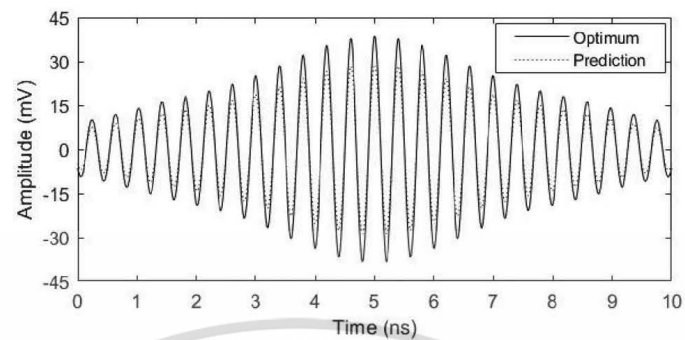


Figure 8 The comparison of group delay between different Tx – Rx antennas height.

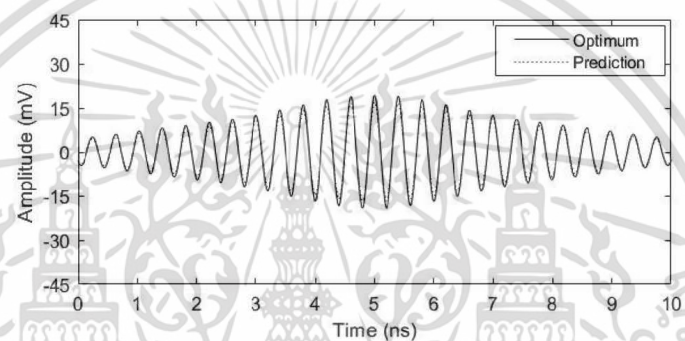
this distance, the optimum received waveform is different from the predicted received waveform due to the near-field region.

On the other hand, Figures 9(b) and 9(c) show the comparison of the received waveform between the optimum and prediction cases at 0.6 m and 0.9 m distances, respectively. At these distances, the measured received waveform and predicted received waveform are almost the same. From these results, we conclude that the received waveform is related to a near-field region of the antenna. However, at 0.6 m and 0.9 m distances, there is a little difference between the measured waveform and prediction waveform. It maybe caused due to the reflection of waveform inside the power transformers and the structure of the power transformer.

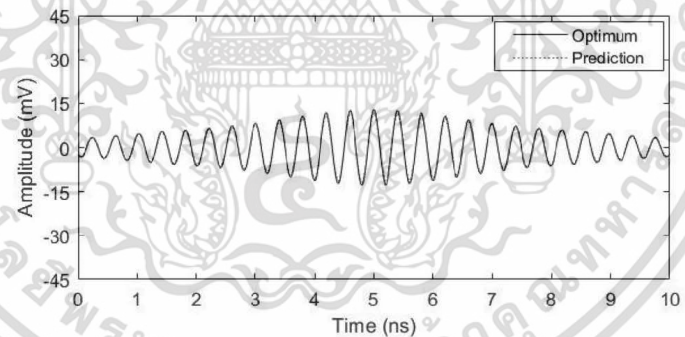
The path loss parameter is useful to investigate a power loss concerning the separation distance between the Tx antenna and the Rx antenna. In our research, the measurement model had been designed to analyze the effect of the Tx – Rx antennas' separation distance in the power transformer. The model was divided into two cases, as presented in the earlier section. The first case is to investigate the difference of path loss at different antenna heights, as presented in Figure 10. The second case is to investigate the difference in path loss between the optimum case and the prediction case, as presented in Figure 11. In Figure 10, the comparison of path loss between different antenna heights is presented. The line style of Figure 10 represented the same meaning as that in Figure 6. It shows that at 5 cm, the antenna height has the lowest path loss compared to other antenna heights. Moreover, the path loss of 20 cm, 40 cm, 60 cm, and 80 cm antenna heights are close to each other and higher than the path loss of 5 cm antenna height.



(a)



(b)



(c)

Figure 9 The received waveform of UHF transfer function at (a) 0.3 m, (b) 0.6 m, and (c) 0.9 m.

In Figure 11, for example, the path loss at the Tx – Rx antennas height of 5 cm is present because at this height the path loss has been less than the others. The comparison of optimum path loss and prediction path loss is presented. The relation path loss due to the far-field region of the antennas

Evaluation of UHF Transfer Function in a Power Transformer 79

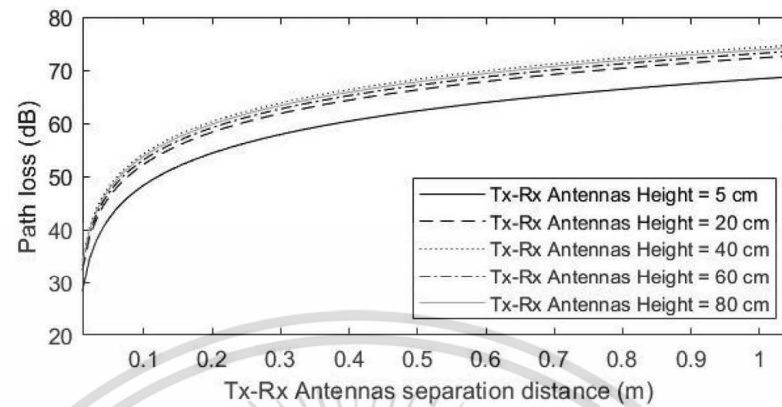


Figure 10 The comparison of path loss between different Tx – Rx antennas height.

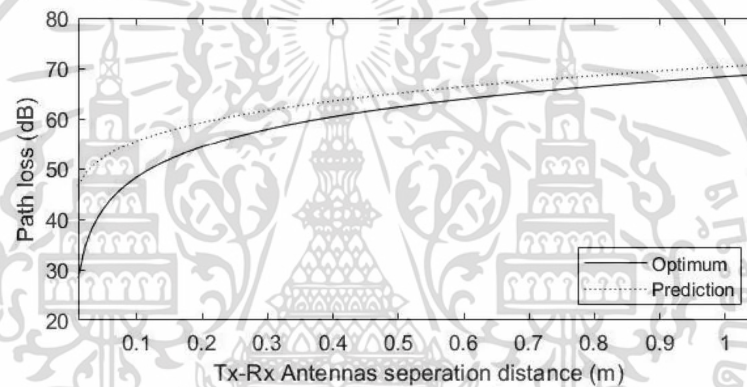


Figure 11 The comparison of path loss of the measured transfer function at Tx – Rx antennas height of 5 cm.

Table 2 The comparison of path loss at Tx – Rx antenna separation distances at 0.3 m, 0.6 m, and 0.9 m with Tx – Rx antennas height of 5 cm.

| | Path loss at Tx – Rx antennas separation distance | | |
|-------------|---|----------|----------|
| | 0.3 m | 0.6 m | 0.9 m |
| Prediction | 61.65 dB | 66.36 dB | 69.47 dB |
| Measurement | 59.22 dB | 65.25 dB | 68.77 dB |
| Error | 2.43 dB | 1.11 dB | 0.70 dB |

is presented by the solid black line and black-dashed line, respectively. The results present a considerable difference in path loss at the far-field region of the antenna. The difference will reduce when the antenna separation distance is further than the Fresnel region of the antenna. The comparison of path loss at 5 cm of the antenna height is given in Table 2. It shows an error between

the optimum path loss and the prediction path loss. At the antenna separation distance of 0.3 m, the path loss error is 2.43 dB. The path loss error at the antenna separation distances of 0.6 m and 0.9 m is 1.11 dB and 0.70 dB, respectively, due to the effect of the antennas' far-field region. The results show that the proposed method can be used to evaluate the UHF transfer function. It will be also useful for application in real-time PD detection and other wireless sensor networks applications.

6 Conclusion

In this paper, the explanation of how to evaluate the complex transfer function in the power transformer with the measured transfer function had been presented for application in real-time PD detection. The modification of the Friis' transmission formula has been used to consider the transfer function measurement in the power transformer channel model. The measurement model has been tested in a real power transformer of the Tesla Power Co., Ltd. The error in complex form in the power transformer had observed by changing the Tx – Rx antennas' height and Tx – Rx antennas' separation distance. The measurement had been done with two UHF microstrip patch antennas which represent the Tx – Rx antennas and record the measured data with the VNA. The calibration had done at the connector and transmission cables before the measurement. The results of the complex form analysis are presented as two different cases. The first case is presented as the comparison of magnitude, phase, group delay, and path loss between different heights of the Tx – Rx antennas. It shows that the lower antenna height has better results than the higher antenna height due to the noise and power transform structure. The second case is presented as the comparison of near-field and far-field between the received waveform and path loss. The latter case shows that the near-field region has an error more than the far-field region due to the radiation field. In conclusion, this paper presents the analysis of the complex form with the measured transfer function. It can be useful for designing real-time PD detection systems in the power transformer and other short-range wireless systems.

Acknowledgments

The authors would like to thank Dr. Norasage Pattanadech, Dr. Chanin Bunlaksananusorn, and Dr. Pichaya Supanakoon from KMITL for support

the experimental and reviewing on our manuscript. We would also like to thank Mr. Sakda Maneerot from the Tesla Power Co., Ltd., for allowing us to use the power transformer.

References

- [1] Q. Huang and K. Kietter, "An intelligent internet of things (IoT) sensor system for building environment monitoring," *Journal of Mobile Multimedia*, vol. 15, no. 1–2, pp. 29–50, January 2019.
- [2] F.D. Miyandoab, J.C. Ferreira, and V.M.G. Tavares, "Analysis and evaluation of an energy-efficient rotating protocol for WSNs combining source routing and minimum cost forwarding," *Journal of Mobile Multimedia*, vol. 14, no. 4, pp. 469–504, October 2018.
- [3] C. Pham, N.N. Diep, and T.M. Phuong, "A wearable sensor based approach to real-time fall detection and five-grained activity recognition," *Journal of Mobile Multimedia*, vol. 9, no. 1–2, pp. 15–26, November 2013.
- [4] A. Graham, N. C. Kirkman, and P. M. Paul, "Mobile radio network design in the VHF and UHF bands: a practical approach," West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2007.
- [5] W. Narzt, L. Furtmuller, and M. Rosenthaler, "Is Bluetooth low energy an alternative to near-field communication," *Journal of Mobile Multimedia*, vol. 12, no. 1–2, pp. 76–90, April 2016.
- [6] D. Benhaddou and J. Naraujo, "Field measurement of an urban two-tier wireless mesh access network: end-user perspective," *Journal of Mobile Multimedia*, vol. 10, no. 1–2, pp. 141–159, May 2014.
- [7] J. Honda, K. Uchida, and M. Takematsu, "Analysis of field intensity distribution in inhomogeneous propagation environment based on two-ray model," *Journal of Mobile Multimedia*, vol. 8, no. 2, pp. 88–104, June 2012.
- [8] J. Shi, K. Cai, C. He, G. Wei, and Z. Shan, "An energy-adaptive path routing approach for wireless sensor networks," *Journal of Mobile Multimedia*, vol. 8, no. 1, pp. 34–48, April 2012.
- [9] A. Setyini, M.J. Alam, and C. Eswaran, "Study and development of the transmission method for large multimedia file size using multimedia messaging service technology," *Journal of Mobile Multimedia*, vol. 8, no. 1, pp. 1–24, April 2012.
- [10] J. Du, W. Chen, L. Cui, Z. Zhang, and S. Tenbohlen, "Investigation on the Propagation Characteristics of PD-Induced Electromagnetic Waves

- in an Actual 110 kV Power Transformer and Its Simulation Results,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 25, No. 5, pp. 1941–1948, October 2018.
- [11] IEC Standard 60270, “Partial discharge measurement,” 3rd Edition, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2000.
- [12] Cigré 502, “High-voltage onsite testing with partial discharge measurement,” Conseil International des Grands Réseaux Électriques, France, 2012.
- [13] IEC/TS Standard 62478, “High voltage test techniques – Measurement of partial discharge by electromagnetic and acoustic methods,” International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2016.
- [14] S. Tenbohlen, D. Denissov, and S. M. Hoek, “Partial discharge measurement in the ultra high frequency (UHF) range,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 6, pp. 1544–1552, December 2008.
- [15] M. Hikita, S. Ohtsuka, J. Wada, S. Okabe, T. Hoshino, and S. Maruyama, “Study of partial discharge radiated electromagnetic wave propagation characteristics in an actual 154 KV model GIS,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 19, no. 1, pp. 8–17, 2012.
- [16] T. Li, X. Wang, C. Zheng, D. Liu, and M. Rong, “Investigation on the placement effect of UHF sensor and propagation characteristics of PD induced electromagnetic wave in GIS based on FDTD method,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 21, no. 3, pp. 1015–1025, 2014.
- [17] W. Gao, D. Ding, W. Liu, and X. Huang, “Investigation of the evaluation of the PD severity and verification of the sensitivity of partial-discharge detection using the UHF method in GIS,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 29, no. 1, pp. 38–47, 2014.
- [18] R. Rostaminia, M. Saniei, M. Vakilian, and S. S. Mortazavi, “Evaluation of transformer core contribution to partial discharge electromagnetic waves propagation,” *International Journal Electrical Power Energy Systems*, vol. 83, pp. 40–48, 2016.
- [19] H. R. Mirzaei, A. Akbari, M. Zanjani, E. Gockenbach, and H. Borsi, “Investigating the partial discharge electromagnetic wave propagation in power transformers considering active part characteristics,” in *Proc. International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, pp. 442–445, 2012.

- [20] J. Du, W. Chen, and B. Xie, "Simulation analysis on the propagation characteristics of electromagnetic wave generated by partial discharges in the power transformer," in Proc. IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), pp. 179–182, 2016.
- [21] H. T. Friis, "A Note on a Simple Transmission Formula," Proc. IRE, Vol 34, no 5, pp. 254–256, May 1946.
- [22] S. Promwong, P. Supanakoon and J. Takada, "Waveform distortion and transmission gain on ultra wideband impulse radio," IEICE Transactions on Communications, vol. E93-B, No. 10, October 2010.
- [23] S. Promwong, W. Hachitani, J. Takada, P. Supanakoon and P. Tangtisanon, "Experimental study of ultra wideband transmission based on friis' transmission formula," 3rd International Symposium on Communication and Information Technologies (ISCIT) 2003, pp. 467–470, September 2003.
- [24] S. Promwong and J. Takada, "Free space link budget estimation scheme for ultra wideband impulse radio with imperfect antennas," IEICE Electronics Express, vol. 1, no. 7, pp. 188–192, 2004.
- [25] S. R. Saunders and A. A. N-zavala, "Antennas and propagation for wireless communication systems," 2nd ed. Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2007.
- [26] Feedback Instrument Ltd., "Microstrip Trainer (MST532)," East Sussex, England, 2005.

Biographies



Sathaporn Promwong received his Ph.D. degree in communications and integrated systems from the Tokyo Institute of Technology (TIT), Tokyo, Japan, his M.Eng. degree in electrical engineering, and his B.Ind.Tech. degree in electronic technology from the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Bangkok, Thailand. He joined the telecommunication

engineering department, faculty of engineering, KMITL. His research interests are in the areas of partial discharge localization, antenna and radio wave propagation, channel measurement for wireless communications, broadcast and multimedia technology, ultra-wideband (UWB) technology, wireless localization, and wireless body area network (WBAN). He is a member of the IEEE, IEICE, and ECTI. He is currently an IEEE Broadcast Technology Society (BTS) Thailand chapter chair.



Thanadol Tiengthong received his B.Eng. degree in electronics and telecommunication engineering from the King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT) and M.Eng. degree in telecommunication engineering from the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL). Now, he is pursuing his doctoral degree at the faculty of engineering, KMITL. His research interests are in the areas of partial discharge diagnosis by electromagnetic method, antenna and radio wave propagation, broadcasting technology, and ultra-wideband (UWB) communications systems. He is a member of the IEEE.



2022 8th International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST) | 978-1-6654-5919-8/22/\$31.00 ©2022 IEEE | DOI: 10.1109/ICEAST55249.2022.9826328

i⁸ceast 2022

Chiang Mai, Thailand

8-10 JUNE 2022

<http://iceast2022.iceast.info/>

Conference Proceeding

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Characterization of Electromagnetic Wave Propagation in Transformer for PD Detection Analysis

Thanadol Tiengthong
School of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok 10520, Thailand
60601188@kmitl.ac.th

Adi Mahmud Jaya Marindra
Department of Electrical Engineering,
Faculty of Engineering
Institut Teknologi Kalimantan,
Indonesia

Norasage Pattanadech
School of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok 10520, Thailand
norasage.pa@kmitl.ac.th

Sathaporn Promwong
School of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok 10520, Thailand
sathaporn.pr@kmitl.ac.th

Abstract—The characterization of transformer wall effects a big problem regarding to the partial discharge, which caused substantial business losses and partial discharge analysis. Previously, there were methods of examination and evaluation using ultrasonic and acoustic waves, for this thesis saw the importance of having studied and done. Test the transmission of electromagnetic waves in a power transformer. The vector network analyzer was used to measure and record the results. A microstrip patch antenna was used to evaluate the experimental measurements on the designed transformer wall at different locations. The results obtained from the experiments will be analyzed, evaluated, and compared to the transfer function of the electromagnetic wave in the transformer. Considering the transfer function, power delay profile, and path loss, in the cases of no obstruction and obstruction from the evaluation and comparative consideration. Studies and experiments show that the data obtained measuring electromagnetic wave characteristics in transformers are guidelines in the study and analysis of partial discharges in the transformer. And primary data for the future analysis of partial discharges in the transformer.

Keywords— partial discharge, UHF method, transformer, propagation loss, delay characteristic

I. INTRODUCTION

Electrical equipment being used outdoors (Outdoor) is covered with insulating materials such as transmission lines, insulators, insulator covers to protect animals, Etc. Must be affected by much pollution for a long time, whether it is moisture, dirt, or animals. These pollution are essential factors that cause damage to electrical equipment insulation. It affects the efficiency of use is reduced to cause a short circuit. It is causing trouble for people who use electricity and instability in the electricity supply system. That is one of the critical factors that limit the electrical safety of insulators in power systems and cause damage to the insulation surface. Starting from the phenomenon of partial electrical discharge on the skin, Knowledge of the factors contributing to insulation deterioration and damage from burns is essential for system stability. Proper design and operation of electrical equipment Previous research have considered using ultrasonic and acoustic emissions to analyze partial discharges in transformers [1].

The acoustic output method measures Partial Discharge (PD) in a resin dry type transformer. Moreover, a waveguide on the transformer's high-voltage winding improves the

propagation of the acoustic signal using a coil with an acoustic output sensor. A waveguide is proposed to improve signal attenuation rapidly. It is also a safe method for measuring electrical equipment. The waveguide is also mounted on a cast resin dry-type transformer. Measurement and locating partial discharge signals for transformers are performed, demonstrating PD locating in transformers [2].

Ultra-high frequency (UHF) is one of the frequency bands regulated by the IEC standard to be used in the PD measurement system of distribution transformer [3-6]. The UHF is widely used in modern wireless communication systems [7], e.g., Wi-Fi, television and radio broadcasting, IoT, cellular network, and UHF PD detection. An investigation of frequency characteristics is necessary to analyze UHF PD detection in distribution transformers accurately. Various types of propagation models are proposed to evaluate the propagation of electromagnetic waves in a

multipath environment. Path loss can be used to evaluate transmission characteristics in general electromagnetic propagation systems. Which provides the ratio between the transmitted and received UHF signals regarding different distances [8]. The electromagnetic wave propagation characteristic needs to be investigated and the transformer tank's effect to achieve precise PD detection.

The simulation design and actual measurement of the electromagnetic waves in the transformer are proposed in this research paper. Hence, an experimental setup was done in an actual distribution transformer tank and used a UHF microstrip patch antenna for both transmitted antenna (Tx) and received antenna (Rx). The results are measured and recorded with a network analyzer operating frequency in the UHF band. A vector network analyzer and a microstrip plate antenna were used to evaluate the experimental results. The results of the measurements were analyzed and evaluated to compare the propagation of electromagnetic waves.

The remaining part of this paper is arranged as follows. In section II, the analysis of electromagnetic waves will be discussed, including path loss and power delay profile. Section III will present this research paper's experimental model and configuration. In section IV, the experimental results are reported and discussed. Finally, the conclusion of this research will be presented.

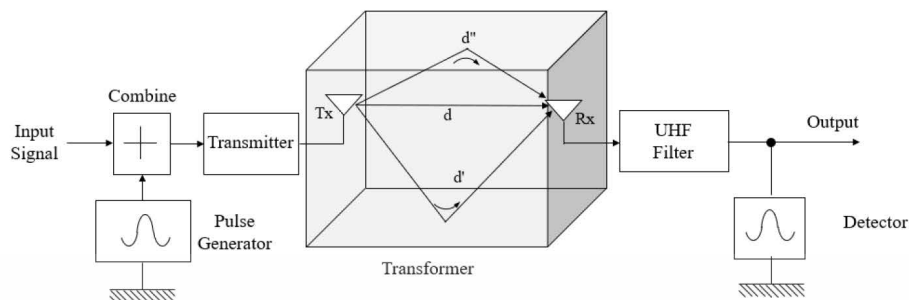


Fig. 1. Electromagnetic wave propagation system analysis.

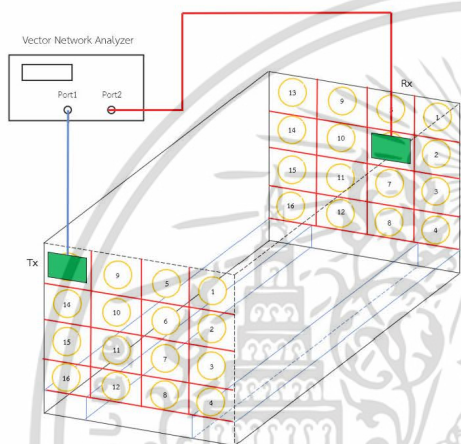


Fig. 2. Model of electromagnetic wave propagation experiment.

II. ELECTROMAGNETIC WAVE PROPAGATION ANALYSIS

A. Path loss

In wireless communication, the main goal of propagation simulation is to predict path loss. Path loss is the ratio of transmit power loss to receiver power, representing the change in the system's signal level regarding the propagation distance [7]. Thus, in this research paper, the path loss will show the electromagnetic wave propagation characteristics inside the transformer. However, as the PD signal is in the time domain, the path loss can be described in the time domain, which is usually expressed in units of decibels, as shown in Eq. 1.

$$PL(t,d) = 10\log(v_i(t,d))^2 - 10\log(v_r(t,d))^2, \quad (1)$$

when

- $PL(t,d)$ is the path loss in time-domain
- $v_i(t,d)$ is the transmitted waveform in time domain
- $v_r(t,d)$ is the transmitted waveform in time domain
- d is the separation distance between Tx - Rx antennas

B. Power delay profile

Another popular parameter to analyze is the power level of the signal coming to the receiver at different times and the effect of multi-reflecting or multipath, as shown. It is the

relationship between the received signal's power level and arrival time. In addition, the time distribution effect can be taken into account. Delay time average and the propagation value of the delay time RMS, calculated as shown in Eq. 2.

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{j=1}^m b_j^2 \tau_j}{\sum_{j=1}^m b_j^2} = \frac{\sum_{j=1}^m P_r(\tau_j) \tau_j}{\sum_{j=1}^m P_r(\tau_j)}, \quad (2)$$

where

- $P_r(\tau_j)$ is the received power from the direction j
- τ_j is the delay time from the direction j
- b_j is the received signal amplitude from the direction j

III. EXPERIMENTAL CONFIGURATION

In this experiment, there will be a system to analyze the channel propagation of the higher frequency band, as shown in Fig. 1. A measurement simulation model was designed to test the transfer function of antennas in transformers from the transmitting side to the receiving side of 16×16 positions. It analyzes the transfer function of the transformer's antenna, affecting the microstrip antenna's efficiency and characteristics.

A microstrip patch antenna is used in the receiving and transmitting sectors. The transmitting and receiving sectors are attached to the transformer's wall by connecting them to both the transmitting and receiving sectors. Change the position of the transmission sector where model 16×16 positions are shown in Fig. 2. Then change the position when one of the transmitting sectors sends to all the receiving sectors. Figure 3 shows the actual picture during the experiment, which took place in the transformer tank provided by TESLA POWER CO., LTD.

The parameters used in this research paper are shown in Table I. This experiment measure frequency ranges from 2.2 GHz to 2.6 GHz. Figure 4 illustrates a microstrip patch antenna used as both Tx and Rx antennas. The Vector network analyzer (VNA) is used in measurement equipment to record the transmitted signal, where the transmitter port and receiver port are set at port-1 and port-2, as shown in Fig. 3. It was noted before initiating the experiment to maximize the signal-to-noise ratio.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE I. EXPERIMENTAL PARAMETERS

| Parameters | Values |
|--------------------|--------------------------|
| Frequency | 2.3 GHz to 2.5 GHz |
| Sweeping points | 801 points |
| Transmitting Power | 20 dBm |
| Tx - Rx Antennas | Microstrip patch antenna |
| Radiation Pattern | Unidirectional |

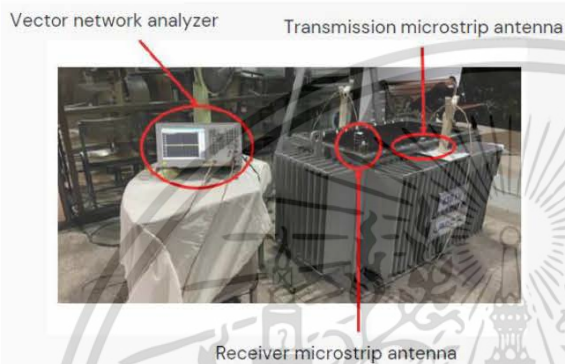


Fig. 3. Experimental setup of electromagnetic wave propagation analysis.

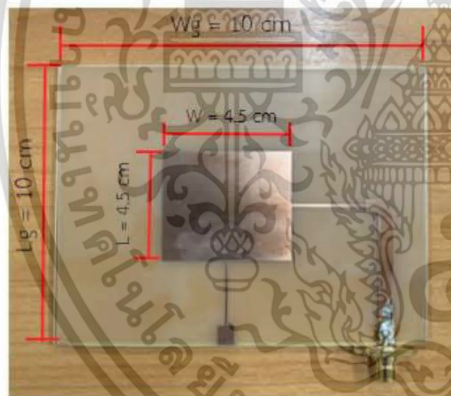


Fig. 4. Microstrip patch antenna.

IV. RESULTS AND DISCUSSIONS

From the sample of the experimental results. The path loss of the signal shows the relationship between the power loss in decibels and the distance between the Tx - Rx antenna position in the transformer under test. The highest path loss was 41.54 dB, and the lowest was 26.59 dB. The location with the path loss values is the position of Tx6 with the receiver side Rx4 shown in Fig. 5. The position of Rx4 is located at the lower corner, and there will be a total reflection in the transformer.

The position with the highest signal path loss is the Tx6 transmitting side position with receiving side Rx4. Due to the antenna structure and total reflection in the transformer, the receiving side Rx4 position is located in the lower corner of the transformer.

The power delay profile shows the power magnitude of the signal at the receiver side microstrip antenna. The power level

depends on the electromagnetic wave being reflected in the transformer, where the wave may have a crossover or reinforcement and cause time delay. Therefore, the incoming wave has a different magnitude, and the time to receive the contract will differ. In this research paper, a matched filter was used. To filter the output signal's delay time by showing the analysis results in a 3D graph. The power delay profile can be shown in Fig. 6 at the Tx6 position, or the midpoint position of the transformer wall has the highest acceptable average power level. The power delay profile of 16x16 has a similar effect on path loss. Because the maximum received power is located on the column opposite the transmitter side. The transmitter side will receive relatively high power where the column is opposite. It can be seen that the transmit and receive 16x16 positions at the Tx6 position, or midpoint position of the transformer wall, have the highest acceptable average power levels. The Tx13 or the top edge of the transformer has the least acceptable average power level.

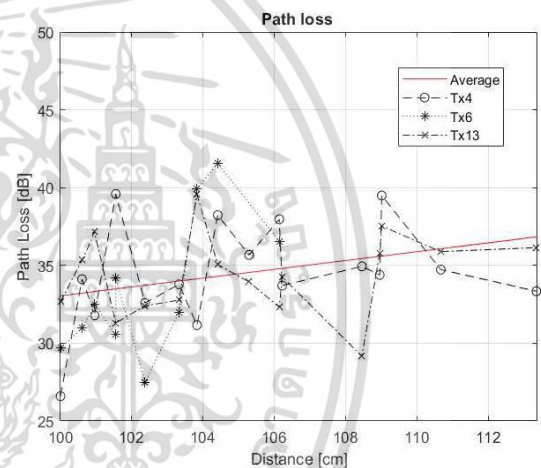


Fig. 5. Comparison of path loss between different Tx position: Tx4, Tx6, and Tx13..

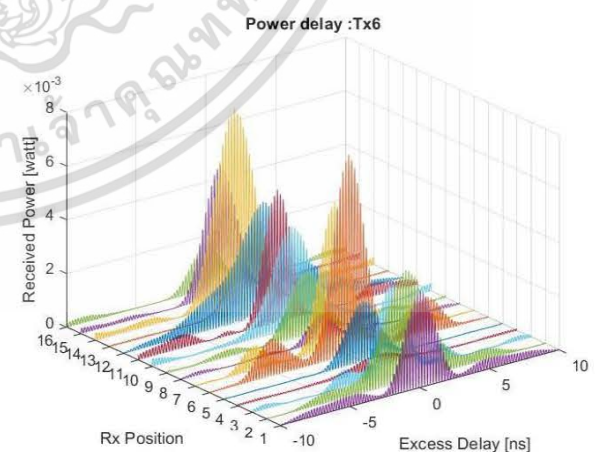


Fig. 6. Comparison of power delay profile between different Rx position in case of Tx6..

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V. CONCLUSIONS

This paper presents an evaluation of electromagnetic wave propagation within a transformer. For their application in detecting partial discharges, signal characterization in transformers with microstrip antennas and vector network analyzers was performed. Then the experimental results were analyzed and evaluated by the MATLAB program. It uses a matched filter to reduce the noise and show the result as the path loss and the power delay profile. It can show the characteristics of electromagnetic wave propagation occurring differently, and the results of each antenna's position in the transformer have been discussed. From the results, it can conclude that the contributions of this paper are helpful in UHF PD detection that requires an accurate model to evaluate the UHF transmission channel inside the distribution transformer.

ACKNOWLEDGMENT

The authors thank Mr. Nattawut Suphawirojler, Mr. Thinnaphat Phongsungnoen, and Mr. Thanakrit Phuraesri for help in the prepare the equipment and measuring the data.

REFERENCES

- [1] J. Du, W. Chen, L. Cui, Z. Zhang, and S. Tenbohlen, "Investigation on the Propagation Characteristics of PD-Induced Electromagnetic Waves" *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 25, No. 5, pp. 1941-1948, October 2018.
- [2] Z. Tang, W. Chang, and M. He, "Location of PDs inside Transformer Windings using UHF Methods", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 21, No. 1, Feb. 2014.
- [3] A. Haddad and D. Warrim, *Advance in High Voltage Engineering*, London, IET Power and Energy Series 40, pp. 1-74, 2007.
- [4] IEC Standard 60270, "Partial discharge measurement." 3rd Edition, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2000.
- [5] Cigr'e502. (2012) High-voltage onsite testing with partial discharge measurement, Conseil International des Grands Réseaux Électriques, France.
- [6] IEC/TS Standard 62478, "High voltage test techniques – Measurement of partial discharge by electromagnetic and acoustic methods." International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2016.
- [7] T. S. Rappaport, "Wireless communications: principles and practice." Vol. 2. New Jersey: prentice hall PTR, 1996.
- [8] S. Promwong, J. Takada, P. Supanakoon and P. Tangtisanon, "Path loss and matched filter gain of free space and ground reflection channels for UWB radio systems," 2004 IEEE Region 10 Conference TENCON 2004., Chiang Mai, pp. 125-128 Vol. 3, 2004.



ECTI-CON 2019

Proceedings

10 - 13 July 2019
Pattaya, Thailand

*International Conference on Electrical Engineering/Electronics,
Computer, Telecommunications and Information Technology*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Study of Partial Discharge Localization in Transformer

Thanadol Tiengthong
Faculty of Engineering,
King's Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
thanadol.ti@gmail.com

Sathaporn Promwong
Faculty of Engineering,
King's Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
sathaporn.pr@kmitl.ac.th

Abstract— Power breakdown in high voltage transformers are very critical problem which cause a serious loss to the related economy. Partial discharge is one of the causes that issue the power breakdown. To identify the partial discharge before the breakdown occur, there are different kind of method, such as UHF method, acoustic method and light phenomena. Since the various kind of material in transformer which made partial discharge localization become more difficult. To achieve high accuracy in partial discharge localization in power transformer the min-max technique and trilateration technique with time of arrival and received signal strength are introduce in this research paper. This paper focus on the partial discharge localization with UHF method which use the advantage of electromagnetic signal to find the partial discharge location. The set of microstrip patch antenna which operate in UHF bandwidth ranging from 1 GHz to 3 GHz are use as transmitter and receiver antenna. The measurement results are present by the cumulative distribution function of partial discharge localization distance error, to investigate the suitable technique and parameter for partial discharge localization in power transformer. From the result, the trilateration technique with time of arrival parameter is provide the most accuracy results than other technique and parameter.

Keywords— Partial Discharge Localization, RSS, TOA, Trilateration Technique, Min-Max Technique

I. INTRODUCTION

Partial discharge localization is an important research topic for analyse the transformer performance. Its require a state of art from both electrical engineering and telecommunications engineering. Dielectrics material in the transformers may degrade due to the partial. There are various method to analyses the partial discharge, in order to investigate a cause of partial discharge, the UHF technique was introduced as one of the test method that have better performance in term of electrical interference when compare with acoustic method or electrical based methods [1-3].

Partial discharge localization with UHF method is like the normal wireless localization. Therefore, some parameter which use in wireless localization can be use in partial discharge localization, i.e., time difference of arrival, received signal strength, angle of arrival, and time of arrival [4]. Various kind of technique in wireless localization, e.g., min-max, weighted centroid, and trilateration are able to apply in the partial discharge localization [5-7]. The received signal strength and time of arrival are parameter that take into account in partial

discharge localization in this paper, while the separation distance between target position and transmitter antenna are used to study the suitable technique. The measure results are record and collect by VNA with the operating bandwidth in UHF band. The accuracy of the results are verify and evaluate with the CDF, which present the comparison between each localization techniques and parameters.

The structure of this paper is arranging as follow. The system model of the partial discharge localization including model, parameter, and method are describe in section II. In section III, the experimental model is present. Section IV and V will discuss the experimental results and conclusions, respectively.

II. SYSTEM MODEL OF PARTIAL DISCHARGE LOCALIZATION

A. Propagation model

The propagation system model in this paper is consider use the typical sinusoid waveform as the transmitted waveform, due to the similarity of wireless communication and partial discharge localization with electromagnetic method in UHF band. The mathematical form of sinusoid waveform can be described as.

$$y(t) = A \sin(2\pi ft + \varphi), \quad (1)$$

Where the waveform in function of time is $y(t)$, the amplitude of signal waveform is A , the signal waveform phase is φ , while the frequency of signal waveform is f .

The spectrum density of the received propagation signal $V_r(f)$ in this paper can be given in mathematic form as.

$$V_r(f) = V_t(f)H_c(f), \quad (2)$$

where the transfer function of propagation in frequency domain is $H_c(f)$. The IFFT can used to determine the received waveform as describe in Eq. (3)

$$v_r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_r(f) e^{j\omega t} df \quad (3)$$

B. The parameters of partial discharge localization

The location estimation of partial discharge can be done by using various kind of parameter. The common parameter that usually consider used us the received signal strength. It is focus on the location estimation with the relationship between received signal strength ant the separation distance between the propagation source and the target position. In this paper, the maximum value of received signal strength ($\max P_r$) is describe in mathematic form as

$$\max P_r = \log \left[\max |v_r(t)| \right]^2, \quad (4)$$

The maximum value od received power will used to determine the separation distance between the propagation source and the target position d_{RSS} by the following equation

$$d_{RSS} = d_0 \cdot 10^{\frac{|P_0 - P_{\max}|}{10n}}, \quad (5)$$

where the parameter d_0 is the fixed distance from the propagation source, P_0 is the power received at the propagation source, and n is the path loss component.

Another parameter that can use to estimate the partial discharge distance is time of arrival. It is considering the propagation time of the signal from the propagation source to the target location. The time of arrival parameter usually present in term if time delay which can be describe as

$$\tau = \arg \max |v_r(t)|, \quad (6)$$

When the time delay can use to determine the estimation distance with time of arrival parameter d_{TOA} by the given equation.

$$d_{TOA} = c \cdot \tau_1 (ns), \quad (7)$$

where c is the propagation speed of electromagnetic wave, and the maximum time delay is $\tau_1 (ns)$.

C. The techniques of partial discharge localization

There are various kind of wireless localization techniques [8,9]. However, in this research, the min-max and trilateration technique are present. The similarity of these two technique is the benefit from the intersect area of the geometry shape in each technique that assume as the propagation area of the propagation source as present in Fig. 1 and Fig. 2, respectively. The parameters are used to estimate with these two technique, by consider the relationship between time and distance and the relationship between signal strength and distance.

In trilateration technique, the target location can be determined by the circle equation which use to determine the cross line between three circles in the intersect area. The

mathematic form of the circle equation according to the time of arrival parameter and received signal strength parameter are describe as

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = d_{TOA}^2, \quad (8)$$

and

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = d_{RSS}^2, \quad (9)$$

where (a,b) and (x,y) are represent by the location of the target position and propagation source in coordinate system, respectively.

III. PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENTAL SYSTEM

The measurement of partial discharge was done by using VNA to record the channel transfer function of propagation signal. The UHF band is considered use as the operate bandwidth. The microstrip patch antenna is use as the antenna for both transmission side and receiver side.

The measurement model is separate into two part. The first step is done by initiate the channel transfer function measurement in the assigned reference position. The reference position is use to verify the accuracy of the measurement result in term of distance error. In the second step, the channel transfer function in all target position will be measured. The distance error of the results is verified and evaluated by the CDF. The measurement parameter is present in table. 1

TABLE I. PARTIAL DISCHARGE LOCALIZATION MEASUREMENT PARAMETER

| Parameter | Value |
|---------------------|--------------------------|
| Frequency Bandwidth | UHF: 1-3 GHz |
| Type of antenna | Microstrip patch antenna |
| Reference position | 45 positions |
| Target position | 81 positions |

IV. RESULTS AND DISCUSSIONS OF THE PARTIAL DISCHARGE LOCALIZATION

The distance error of the results is present in Fig. 4-7. The comparison of CDF of the trilateration technique with time of arrival parameter and received signal strength parameter are present in Fig. 4 and Fig.5, respectively. The results present the significant different between two parameters. The time of arrival parameter have the accuracy more than the received signal strength parameter. In Fig. 6 and Fig.7, the comparison of distance error of min-max technique with the proposed parameter is presented. The results from min-max technique present the similar distance error in both parameter. Nonetheless, from the results, it is present that the trilateration technique have more accuracy than the min-max technique and the time of arrival parameter have more accuracy than the received signal strength parameter. The average distance error

and maximum distance error of each techniques and parameters are present in table II.

TABLE II. THE DISTANCE ERROR OF THE MEASUREMENT RESULTS

| Distance Error (m) | Trilateration | | Min-max | |
|--------------------|---------------|------|---------|------|
| | TOA | RSS | TOA | RSS |
| Average | 0.21 | 0.48 | 0.6 | 0.63 |
| Maximum | 0.41 | 1.56 | 2.09 | 2.09 |

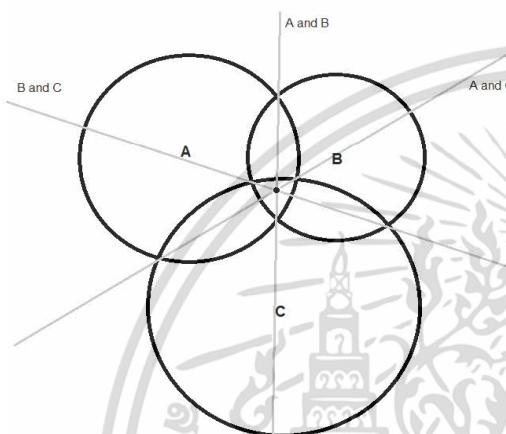


Fig. 1. The trilateration technique.

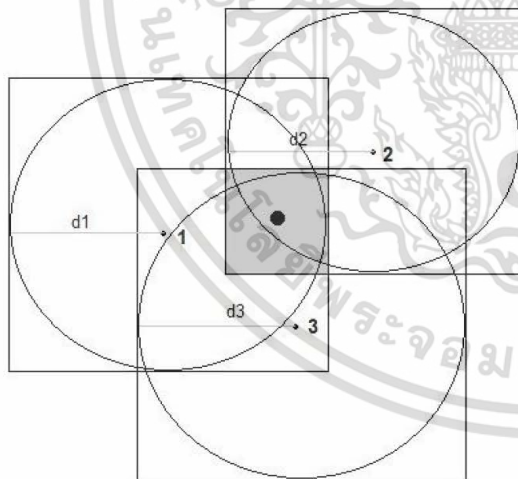


Fig. 2. The Min-Max technique.

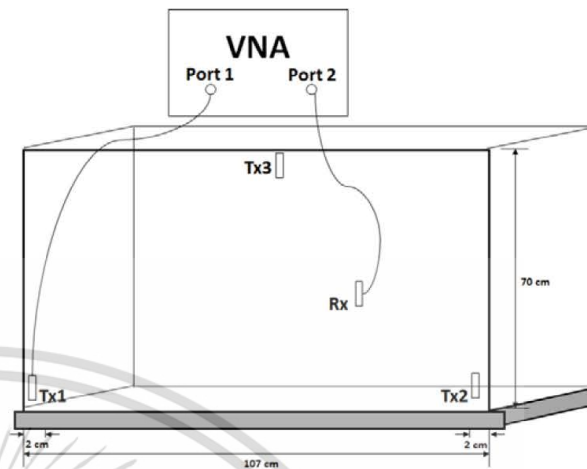


Fig. 3. Partial discharge localization system model.

V. CONCLUSION

The partial discharge localization measurement with the comparison between different kind of localization techniques and parameters is describe in this paper. The measurement is based in the electromagnetic method with the operate bandwidth in UHF band. VNA and microstrip patch antenna are used to measurement the channel propagation transfer function of the result. The distance error of each parameters and techniques is present in term of CDF. The Trilateration technique perform the best accuracy among the proposed techniques. And the time of arrival have the accuracy more than the received signal strength parameter. Therefore, the trilateration technique with time of arrival parameter is the most accuracy in this research. The results of this research are useful for the partial discharge localization with electromagnetic method. Moreover, other parameter and technique should be investigated to determine the optimum method in partial discharge localization in the future.

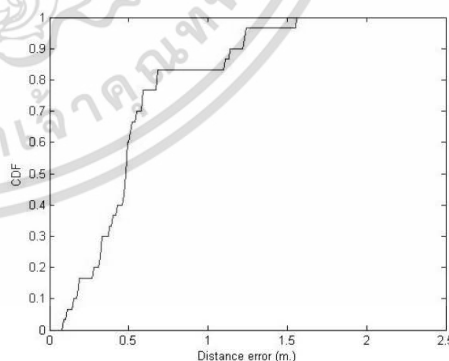


Fig. 4. The CDF of distance error using trilateration technique with RSS .

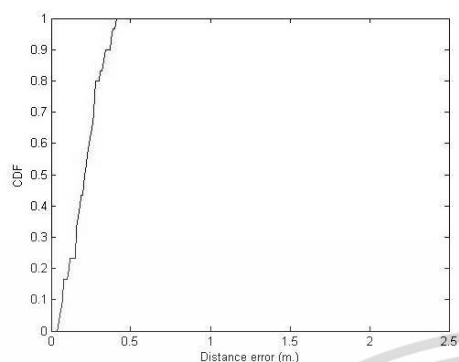


Fig. 5. The CDF of distance error using trilateration technique with TOA.

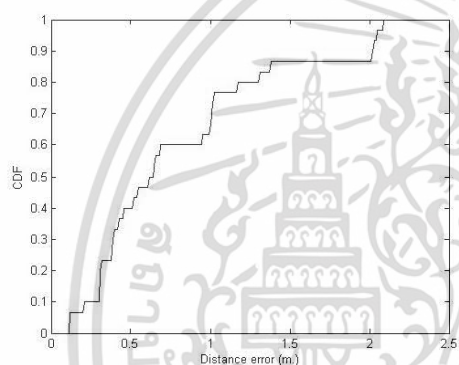


Fig. 6. The CDF of distance error using min-max technique with RSS.

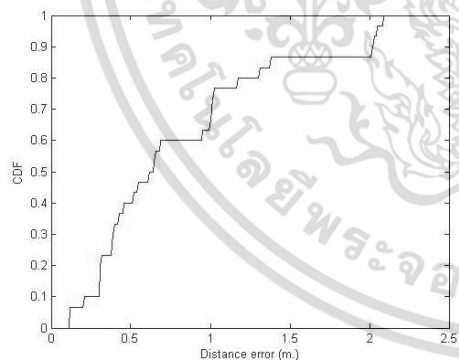


Fig. 7. The CDF of distance error using min-max technique with TOA.

REFERENCES

- [1] Z. Tang, W. Chang, and M. He, "Location of PDs inside Transformer Windings using UHF Methods", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 21, No. 1, Feb. 2014
- [2] D. Dukanac, "Application of UHF Method for Partial Discharge Source Location in Power Transformers", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 25, No. 6, Dec. 2018
- [3] A. Haddad and D. Wann, *Advance in High Voltage Engineering*, London, IET Power and Energy Series 40, pp. 1-74, 2007.
- [4] L. Zhang, L. Ma, Y. Xu, and C. Li, "Linear Regression Algorithm against Device Diversity for Indoor Localization System", *GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference*, Dec. 4-8, 2017.
- [5] A. Kuntal, P. Karmakar, and S. Chakraborty, "Optimization Technique Based Localization in IEEE 802.11", *IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE-2014)*, May 09-11, 2014
- [6] A. Kushki, K. N. Plataniotis, and A. N. Venetsanopoulos, *Positioning Systems Principles and applications in location-based services*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 1-140, 2012.
- [7] X. Guo, L. Li, F. Xu, and N. Ansari, "Expectation Maximization Indoor Localization Utilizing Supporting Set for Internet of Things", *IEEE INTERNET OF THINGS JOURNAL*, 2018.
- [8] Y. Liu and Z. Yang, *Location, Localization, and Localizability Location awareness Technology for Wireless Networks*, New York, Springer, pp. 1-145, 2011.
- [9] J. F. Sanford, M. Potkonjak, and S. Slijepcevic, *Localization in wireless Network Foundations and Applications*, New York, Springer, pp. 1-192, 2012.

ประวัติผู้เขียน

| | |
|--------------------|--|
| ชื่อ-นามสกุล | นายธนดล เตียงทอง |
| วัน เดือน ปีเกิด | 22 มกราคม พ.ศ. 2535 |
| ที่อยู่ | 26/5 หมู่ที่ 3 ถนนขวาง ตำบลวิจิตร อำเภอเมืองภูเก็ต จังหวัดภูเก็ต 83000 ประเทศไทย |
| ประวัติการศึกษา | 2555 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสารและ อิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณบุรี 2559 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| ความชำนาญเฉพาะด้าน | 1.) ระบบโทรคมนาคม 2.) การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ 3.) การตรวจหาการดิสซาร์จบางส่วนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 4.) เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง 5.) โครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์ 6.) การหาตำแหน่งไร้สาย |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้